

**Modelação de Equações Estruturais para avaliar e monitorizar o
Estado de Condição de um sistema mecânico**

por

António Rogério Silva

**Dissertação apresentada como requisito
parcial para obtenção do grau de**

Mestre em Estatística e Gestão de Informação

pelo

**Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação da
Universidade Nova de Lisboa**

**Modelação de Equações Estruturais para avaliar e monitorizar o
Estado de Condição de um sistema mecânico**

por

António Rogério Silva

**Dissertação apresentada como requisito
parcial para obtenção do grau de**

Mestre em Estatística e Gestão de Informação

pelo

**Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação da
Universidade Nova de Lisboa**

Orientadores:

PHD Valter Martins Vairinhos

PHD Victor Lobo

Agradecimentos

Aos professores Valter Vairinhos e Victor Lobo, pelo incentivo amigo e pela “luz”.

Ao Professor Doutor Valter Vairinhos, pelos conhecimentos que me transmitiu, pelo exemplo e pelos valores que representa.

Ao Professor Doutor Victor Lobo, pelo incentivo nos momentos menos bons, pelos conhecimentos que me transmitiu, pelo exemplo de energia e vontade.

Ao Comando da Escola Naval, pelo empenho na valorização do seu corpo docente. Aos camaradas do Departamento de Engenharia Naval – Mecânica e em especial ao seu coordenador Eng.^o Victor Bernardino pelo acolhimento no projecto MECPAB.

A todos aqueles que me deram os seus contributos e sugestões.

À minha Família.

Resumo

A Modelação com Equações Estruturais (SEM, do inglês Structural Equation Modeling), é uma metodologia muito utilizada nas ciências sociais por ser especialmente adequada ao estudo de fenómenos complexos. Neste trabalho aborda-se a possibilidade de adoptar esta metodologia à modelação do estado das máquinas, tendo em vista implementar políticas de manutenção baseadas no estado ou condição (CBM, do inglês Condition Based Maintenance).

Começa-se por uma revisão bibliográfica do conceito de Manutenção, de forma a enquadrar CBM, e do conceito SEM, identificando variáveis latentes e variáveis indicadoras.

Seguidamente, é proposto um modelo para um motor marítimo de propulsão, testado inicialmente com dados artificiais a fim de averiguar da sua robustez, passando-se de seguida para a recolha e tratamento de dados reais.

Finalmente conclui-se que a metodologia apresenta potencialidades para este tipo de problemas, alargando a possibilidade de aplicação de SEM a um domínio até à data não explorado, o da avaliação do Estado de Condição de um sistema mecânico, com a aplicação do conceito de variáveis latentes.

Palavras chave: Análise de Dados Multivariados, Manutenção, Manutenção Baseada na Condição, Manutenção Preditiva, Modelos Estruturais de Equações.

Abstract

Structural Equation Modelling (SEM) is a widely used methodology in social sciences, as it is especially appropriate in the study of complex phenomenon. This work broaches the possibility of adopting this methodology in machine maintenance, in order to make Condition Based Maintenance (CBM) possible.

It starts with a bibliographical review of the Maintenance concept, in order to fit in CBM and the SEM concept, identifying the latent multivariate and variable indicators.

A structural model is proposed to model the behavior of a propulsion engine. Following this, the model is tested using artificial data with the objective of evaluating its robustness. Subsequently, it is tested using real data.

Finally, we conclude that this method shows potential in dealing with these kinds of problems, thus, widening the possibility of applying SEM in an area which has not been explored before now. In addition to this, it also evaluates the Conditional State of a mechanical system, while applying the concept of latent variables.

Keywords: condition based maintenance; maintenance; predictive maintenance; structural equation modeling; multivariate data analysis.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract	iii
Índice de Figuras.....	v
Índice de Tabelas	v
Índice de Quadros.....	vi
1. Introdução.....	1
2. - Revisão da literatura	5
2.1 O conceito de Manutenção	5
2.1.1 Tipos de Manutenção.....	7
2.2 Modelação de Equações Estruturais, uma técnica de análise multivariada	17
2.2.1. Análise multivariada	17
2.2.2. Métodos de análise multivariada	17
2.3. METODOLOGIA. STRUCTURAL EQUATION MODELING	22
2.3.1. “ Overview”	22
2.3.2. Metodologia	23
2.3.3. Tipos de variáveis	24
2.3.4. Modelo estrutural e modelo de medida	25
2.3.5. Identificação, estimação e teste de adequação do modelo.....	28
2.3.6. Medidas de adequação do modelo metodologia PLS.....	30
3. Metodologia. Aplicação a um motor marítimo de propulsão	32
3.1. APLICAÇÃO EXPERIMENTAL DO MODELO PROPOSTO.....	36
3.1.1. Aplicação experimental do modelo proposto com dados artificiais	36
3.1.2. Aplicação experimental do modelo proposto a dados reais.....	39
4. Conclusões	44
Anexo 1.-Relatório SmartPLS (Institute of Management and Organizations, UOH, Germany (2008)	I
Anexo 2 - .Aplicação experimental com dados artificiais	II
Anexo 3 - Aplicação experimental com dados reais	VI
Anexo 4 - Proposta de novo modelo	IX

Índice de Figuras

Figura 1 – Taxinomia de filosofias de manutenção baseada na ILDINAV 802	9
Figura 2 – Taxinomia de filosofias de manutenção baseada na (EN 13306, 2001)	9
Figura 3- Taxinomia de filosofias de manutenção (Kothamasu, 2005)	9
Figura 4 - Métodos de análise multivariada	18
Figura 5 - Etapas para a construção de um modelo de equações estruturais.....	24
Figura 6 - Modelo estrutural com duas variáveis endógenas e duas variáveis exógenas	26
Figura 7 – Modelo Reflectivo	27
Figura 8 – Modelo Formativo	28
Figura 9 – Modelo Misto	28
Figura 10 - Modelo proposto para um motor marítimo de propulsão.....	32
Figura 11 - Resultados da aplicação do modelo	40

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Vantagens da CBM (adaptado de Cabral, 2006, p. 219)	16
Tabela 2 – Variáveis Latentes endógenas e variáveis observáveis associadas	34
Tabela 3 – Variáveis Latentes exógenas e variáveis observáveis associadas	35
Tabela 4 - Tipologia dos estados de condição	36
Tabela 5 – Tipologia de Estados de Condição – valores das variáveis observadas.....	37
Tabela 6 – Modelo Estrutural - coeficientes de impacto.....	37
Tabela 7 – Modelo de medida formativo - coeficientes de impacto.....	37
Tabela 8 - Modelo reflectivo - coeficientes de impacto	37
Tabela 9 - Modelo formativo – e modelo reflectivo: estimativas dos impactos directos e seus desvios padrão	38
Tabela 10 - Estimativas dos parâmetros e dos seus desvios padrões	38
Tabela 11 - Quality Criteria - Overview - com introdução crescente de ruído	39
Tabela 12 - Média e desvios padrões dos valores das variáveis indicadoras, para os diferentes equipamentos	40
Tabela 13 - Média e desvios padrões dos valores das variáveis indicadoras, para o conjunto dos equipamentos	40
Tabela 14 - Modelo estrutural – impactos	41

Tabela 15 – Modelo estrutural - efeitos totais.....	41
Tabela 16 - Modelo de medida – peso dos indicadores.....	42
Tabela 17 - Índices das variáveis latentes	42
Tabela 18 - Quality Criteria - Overview –	42

Índice de Quadros

Quadro 1 – Técnicas de primeiro diagnóstico - Fonte: ILDINAV 802.....	3
Quadro 2 – Técnicas de diagnóstico analítico - Fonte: ILDINAV 802.....	3

*Prouvera a Deus que o nosso horizonte pudesse
alargar-se todos os dias! As pessoas que se cingem a
sistemas são incapazes de abarcar a verdade inteira e
tentam agarrá-la pela cauda; um sistema é como a
cauda da verdade, mas a verdade é como um lagarto;
deixa-nos a cauda nos dedos e foge, sabendo
perfeitamente que lhe crescerá uma nova num abrir e
fechar de olhos.*

IVAN TURGUENIEV a Leão Tolstoi
(1856)

*O mistério eterno do Mundo é a sua
compreensibilidade.*

ALBERT EINSTEIN
(1936)

1. Introdução

Manutenção é o conjunto de actividades realizadas num sistema para o manter em condições de funcionamento. Os custos de manutenção representam uma parte significativa dos custos totais de operação de qualquer indústria. Dependendo do tipo de industria estes custos podem representar entre 15 a 40% (Shikari, 2006) do custo final dos bens produzidos. Assim, é normal num cenário de recursos escassos a preocupação permanente com a redução da factura associada a acções de manutenção e a multiplicidade de estudos com esse fim.

Em Jardine (Jardine et al, 2006), entende-se por manutenção *“a combinação de acções técnicas, administrativas e de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um equipamento em condições de desempenhar, eficazmente, as funções para as quais foi projectado. Representa, ainda, um conjunto de acções sistemáticas e procedimentos que visam manter as condições originais dos equipamentos, introduzindo melhorias para evitar a ocorrência ou reincidência das falhas e reduzir os custos. Deve evitar a indisponibilidade dos equipamentos, abrangendo, desde a aparência externa até as perdas de desempenho.”*

De entre os vários tipos de manutenção apresentados, importa para o presente estudo a Manutenção Preditiva por Controlo de Condição (conforme taxinomia adoptada neste trabalho) (Kothamasu, 2005), também designada por manutenção planeada preventiva condicionada (EN 13306, 2001), e habitualmente conhecida como Manutenção Baseada na Condição (CBM, do inglês Condition Based Maintenance) (Jardine et al., 2006). A CBM visa possibilitar que os equipamentos operem por mais tempo e com mais elevado grau de fiabilidade, pois as intervenções ocorrem com base em dados técnicos e diagnósticos, ou seja em função do estado de condição e não por “via de calendário”. Ainda, de acordo com Jardine *“Manutenção condicionada é o conjunto de procedimentos de acompanhamento dos indicadores ou parâmetros técnicos do estado dos equipamentos, visando definir a necessidade ou não de intervenções”*.

De entre os benefícios da CBM, salientam-se o aumento da disponibilidade das máquinas e equipamentos, redução de custos, redução do tempo de paragem para reparação, redução dos stocks de sobressalentes e o aumento da segurança. A implementação de programas de

Manutenção Baseada na Condição e suas vantagens encontram-se bem documentadas por Bengtsson e Jardine (Bengtsson, 2003; Bengtsson, 2004; Bengtsson & Jackson, 2004; Bengtsson et al, 2006; Jardine, 1996; Jardine, 2002; Jardine et al, 2006).

Conforme já referido, a CBM assenta na utilização de técnicas de diagnóstico que visam identificar sintomas que denunciem a existência de anomalias num estado precoce de desenvolvimento. Dada a grande diversidade de equipamentos, órgãos e componentes a controlar, e a multiplicidade de sintomas, o leque de técnicas existentes é também bastante variado.

Tendo em vista a aplicação de CBM, a Armada Portuguesa define na sua doutrina de manutenção (ILDINAV 802) dois grupos de técnicas de diagnóstico:

- a. *“Técnicas de primeiro diagnóstico, que utilizam instrumentos de medida de fácil manuseamento, os quais fornecem uma primeira indicação da alteração dos parâmetros.”* (quadro 1)
- b. *“Técnicas de diagnóstico analítico, que recorrem a equipamentos mais complexos e que explicam mais detalhadamente as anomalias, relacionando-as com as causas”.* (quadro 2)

Quadro 1 – Técnicas de primeiro diagnóstico - Fonte: ILDINAV 802

TÉCNICA	APLICAÇÃO
Ensaio visual	Deteção de defeitos superficiais nos materiais com ou sem equipamento auxiliar de diagnóstico
Líquidos penetrantes	Deteção de defeitos superficiais nos materiais
Magnetoscopia	Deteção de defeitos superficiais nos materiais
Ultra-sons	Deteção de defeitos internos nos materiais
Controlo sensorial genérico	Deteção qualitativa de anomalias
Controlo de variáveis	Verificação dos desvios das variáveis sob controlo
Controlo de resistências e indutâncias	Verificação dos circuitos eléctricos, nomeadamente dos enrolamentos dos motores eléctricos e alternadores.
Nível vibrométrico global	Avaliação da severidade vibratória de componentes dinâmicos.
Medição de impulsos de choque	Verificação do estado de rolamentos
Termografia	Medição de temperaturas, sem contacto com o equipamento, em sistemas dinâmicos
Termometria	Medição de temperaturas (de fluidos em circulação, em chumaceiras, etc.)
Análises expeditas	Análise de óleos e outros fluidos (contaminação, viscosidade, etc.)

Quadro 2 – Técnicas de diagnóstico analítico - Fonte: ILDINAV 802

Análises clássicas	Análise laboratorial das características físico /químicas
Espectrometria	Avaliação dos desgastes em sistemas dinâmicos (redutores, sistemas hidráulicos, sistemas de circulação, etc.)
Ferrografia	Qualificação do desgaste em sistemas dinâmicos
Análise espectral de vibrações	Identificação da origem das vibrações
Radiografia / Gamagrafia	Deteção e qualificação de defeitos internos nos materiais
Ultra-sons	Qualificação dos defeitos internos nos materiais
Análise de curvas	Deteção de frequência de ressonância, análise da forma da onda vibro métrica, etc.

Na Escola Naval está em curso um projecto de investigação, denominado MECPAB (Monitorização do Estado de Condição e Previsão de Avarias de Bordo), que visa desenvolver técnicas que permitam estabelecer uma política manutenção assente no paradigma CBM. Usando diversas técnicas, pretende-se monitorizar o funcionamento de vários equipamentos de navios, de modo a que seja possível prever e prevenir a ocorrência de avarias.

No âmbito deste projecto foi entendido como relevante investigar a possibilidade de apresentar e desenvolver um modelo alternativo às abordagens de manutenção clássicas, que consistem em medir indicadores físicos tais como temperaturas, vibrações e pressões, para passar a avaliar os estados de condição operacional, usando variáveis latentes, obtidas

a partir de Modelos de Equações Estruturais (SEM, do inglês Structural Equation Modeling), (Bollen, 1989).

SEM é uma metodologia particularmente adequada ao estudo de fenómenos complexos que envolvem uma grande diversidade de factores. Assim, é muito aplicada no estudo de fenómenos sociais, usualmente com uma difícil formulação matemática, pela necessidade de adoptar considerações de natureza abstracta. São exemplo disto, as aplicações em marketing, psicologia, sociologia, e ciências da saúde.

Considera-se que a aplicação de SEM constitui uma possibilidade nova de abordagem a problemas CBM. Com efeito, nas abordagens clássicas de avaliação do estado de condição os técnicos, usualmente com formação de base tecnológica (engenharia mecânica, electrónica e electrotécnica), utilizam indicadores físicos, directamente observáveis e mensuráveis, tais como temperaturas, vibrações, pressões, diferenças de potencial e resíduos, associados a regras causais definidas por leis físicas, para aferir do estado da condição do material. Neste trabalho os indicadores de base a utilizar são os mesmos. A novidade está em aplicar esta metodologia a este tipo de problemas, alargando, deste modo, a aplicação de SEM a um domínio até à data não explorado, o da avaliação do Estado de Condição de um Sistema Mecânico, com a aplicação do conceito de variáveis latentes. As variáveis latentes não são observadas directamente, mas sim percebidas de forma algo abstracta.

Resumindo, pretende-se com esta dissertação introduzir o conceito de variável latente e modelo estrutural na área da manutenção de sistemas mecânicos.

2. - Revisão da literatura

Neste capítulo efectua-se uma revisão dos dois conceitos base para o presente trabalho. O primeiro desses conceitos é o de política de manutenção baseada na condição (CBM, do inglês Condition Based Maintenance), o qual é apresentado em 2.1., enquadrado no conceito de Manutenção e dos seus diferentes paradigmas. Em 2.2. apresenta-se uma visão global dos métodos de análise multivariada, de forma a enquadrar o segundo dos conceitos com relevância para este trabalho, a Modelação de Equações Estruturais (SEM, do inglês Structural Equation Modelling), desenvolvido em 2.3.

2.1 O conceito de Manutenção

O conceito de manutenção apresenta diversas definições e formas de definição.

Relembrando Jardine (Jardine et al, 2006), entende-se por manutenção *“a combinação de acções técnicas, administrativas e de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um equipamento em condições de desempenhar, eficazmente, as funções para as quais foi projectado. Representa, ainda, um conjunto de acções sistemáticas e procedimentos que visam manter as condições originais dos equipamentos, introduzindo melhorias para evitar a ocorrência ou reincidência das falhas e reduzir os custos. Deve evitar a indisponibilidade dos equipamentos, abrangendo, desde a aparência externa até as perdas de desempenho.”*

Em Blanchard (Blanchard, 1998, p. 28) a *“manutenção inclui todas a acções necessárias para manter em ou para restituir a um sistema ou produto uma dada condição de utilização”*. Para Kothamasu (Kothamasu, 2005) *“manutenção designa o conjunto de actividades realizadas num dado sistema para o manter em condição de funcionamento”*. Na Norma Europeia EN 13306, de Abril de 2001, *“manutenção é a combinação de todas as acções técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um bem destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que possa cumprir a função requerida”*, entendendo-se por bem *“qualquer elemento, componente, aparelho, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente”* Ainda na mesma norma, função requerida é definida por *“função ou combinação de funções de um bem consideradas como necessárias para fornecer um dado serviço”*.

Na procura de uma definição agregada, podemos definir manutenção como o conjunto de actividades, que compreendem todas as acções técnicas, administrativas e de gestão, realizadas durante o ciclo de vida de um bem (elemento, componente, aparelho, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente) mantendo ou repondo a sua operacionalidade, em níveis de qualidade, custo, disponibilidade e total segurança, permitindo continuar a cumprir a função ou combinação de funções de um bem tidas como necessárias para fornecer um dado serviço.

O estudo e a evolução dos sistemas e paradigmas de manutenção, anda a “par e passo” com a evolução dos sistemas de produção. Em meados dos anos vinte, a popularização do sistema de produção em massa (habitualmente designado por fordismo¹, ou de produção em escala numa linha de montagem de produtos padronizados) obriga a implementar sistemas de salvaguarda dos elevados investimentos de capital, por ser crítica a disponibilidade das máquinas e equipamentos. A partir da década de cinquenta surge no Japão um novo modelo de sistema de produção flexível², baseado em equipas e no “Just In Time (JIT)” e popularizado pela Toyota, com uma aposta forte nos princípios da qualidade. No sistema de produção flexível, nomeadamente nos domínios das indústrias de ponta, as inovações de carácter tecnológico são fundamentais, baseadas em tecnologia, em trabalho qualificado e altamente qualificado e grande consumidor de tecnologias de informação donde a necessidade de elevadíssimos investimentos de capital que é preciso acautelar e rentabilizar com sistemas de manutenção adequados.

No mercado competitivo actual, a gestão de manutenção assume uma importância crescente pela feroz concorrência, pela necessidade de redução dos tempos de inactividade e dos custos associados a interrupções e alterações de produção não programada (Abdulnour et al, in Kothamasu, 2005, p.2). Daí o grande incentivo para o desenvolvimento de paradigmas diferentes como a “Total Productive Maintenance (TPM)” (Nakajima, 1998, in Kothamasu, 2005, p.2), que visa maximizar a eficiência de equipamentos.

¹ Termo que designa todo o processo de gestão, incluído o de produção, por ter sido Henry Ford a aplicar a produção em serie, com reduções significativas dos custos de produção e aumentos de produtividade, permitindo a aquisição pelo cidadão comum americano do automóvel, no caso do modelo Ford T.

² Também designado nalguma literatura por toyotismo

Outras motivações para a melhoria dos sistemas de gestão da manutenção são a necessidade de implementar sistemas de qualidade do processo conjugada com o propósito de aumento da produtividade (Kothamasu, 2005, p.2) e as preocupações decorrentes do maior rigor da legislação de segurança laboral (acidentes, incómodos e salubridade), e de protecção ambiental (emissões gasosas, descargas líquidas, resíduos sólidos) com impacto nos riscos operacionais associados a encargos com indemnizações e processos judiciais (Rao et al, 1998, in Kothamasu, 2005, p.2). Mesmo quando não exista uma imposição legal a preservação da imagem da empresa é justificação suficiente para adoptar medidas de manutenção adequadas.

Outros objectivos relacionados com uma política de manutenção eficiente são obter o máximo rendimento dos investimentos feitos em instalações e equipamentos, prolongando ao máximo a sua vida útil e mantendo-os em operação o máximo de tempo possível, reduzir ao mínimo os desperdícios, rejeições e reclamações de produtos, apoiar o esforço de vendas da empresa evitando atrasos ou interrupções da produção, reduzir os custos dos consumos em energia e fluidos e conseguir o melhor aproveitamento dos recursos humanos da empresa (Swanson, 2001), (Didelet, 2003), (Cabral, 2006).

Seguidamente é revista a taxinomia e paradigmas de manutenção, sendo dado particular à manutenção preditiva e em particular à CBM, por ser objectivo deste trabalho contribuir para alterar o paradigma de uma política de manutenção essencialmente preventiva para uma política CBM.

2.1.1 Tipos de Manutenção

O paradigma da manutenção evolui e altera-se podendo ser abordado sob diferentes vertentes, filosofia de gestão de manutenção, implementação, tecnologia, técnicas de análise e objectivos para a sua criação (Kothamasu, 2005). Cada paradigma pode ser contextualizado e apresentado como um tipo diferente de Manutenção.

Da revisão da literatura é de realçar a existência de três taxinomias de manutenção, úteis para este trabalho:

- A proposta na ILDINAV 802 (ver figura 1.)
- A proposta na Norma Europeia EN 13306, de Abril de 2001 (ver figura 2.)
- A proposta por Kothamasu (Kothamasu, 2005) (ver figura 3.)

Na ILDINAV 802 e na Norma EN13306-2001, a CBM é classificada como sendo uma manutenção planeada preventiva e condicionada. Em (Kothamasu, 2004 et al in Kothamasu, 2005) a CBM é uma manutenção planeada preditiva e condicionada. As diferenças existentes são de forma, não de conteúdo. De facto, a taxinomia de Kothamasu é mais exaustiva considerando mais tipologias de manutenção, nomeadamente assume-se que existe uma diferença significativa entre prever (manutenção preditiva) e prevenir (manutenção preventiva). Sendo o foco deste trabalho a CBM, adopta-se a taxinomia proposta em (Kothamasu, 2005) por se entender existir maior coerência/concordância nesta distinção com trabalhos recentes publicados trabalhos sobre manutenção e, em particular sobre CBM. É o caso de Dragomir (Dragomir et al, 2009) que afirma, citando:

“A actividade de manutenção....habitualmente estamos a lidar com detecção de avarias, erros de diagnóstico e desenvolvimento, tendo em conta a escolha da gestão entre manutenção preventiva e ou correctiva e com o agendamento destas acções... melhor do que conhecer o fenómeno depois de ele acontecer, como é o caso de uma avaria, é muito mais inteligente antecipar a manifestação do fenómeno para mais cedo ser possível tomar as medidas de protecção mais adequadas. Esta via pode ser definida por processo de diagnóstico.

O prognóstico revela ser uma actividade de manutenção muito promissora na medida em que pode permitir aumentar a segurança, planejar com sucesso as acções de manutenção, reduzir custos e poupar tempo. (Brothernton et al, 2000). Esta estratégia de antecipação por via do prognóstico tem um grande interesse prático e ao mesmo tempo suscita um amplo debate para estudo” (Jardine et al, 2006), de que são exemplo os recentes trabalhos dedicados a CBM, (Ciarapica & G. Giacchetta, 2006), (Heng et al, 2009).

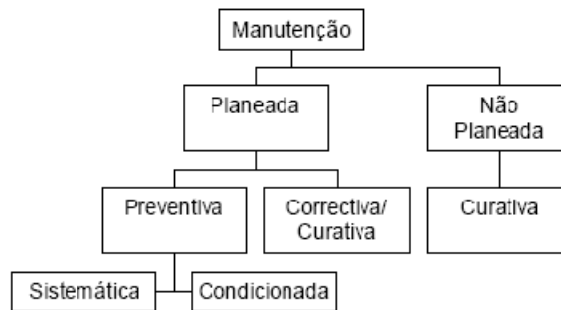


Figura 1 – Taxinomia de filosofias de manutenção baseada na ILDINAV 802

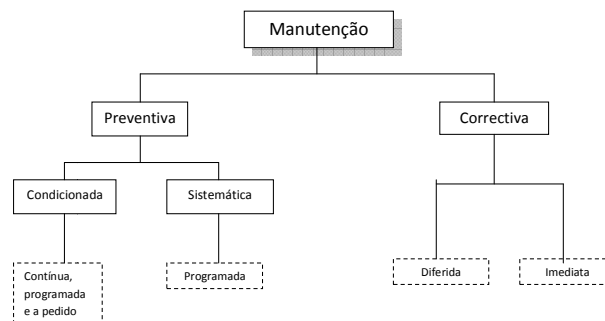


Figura 2 – Taxinomia de filosofias de manutenção baseada na (EN 13306, 2001)

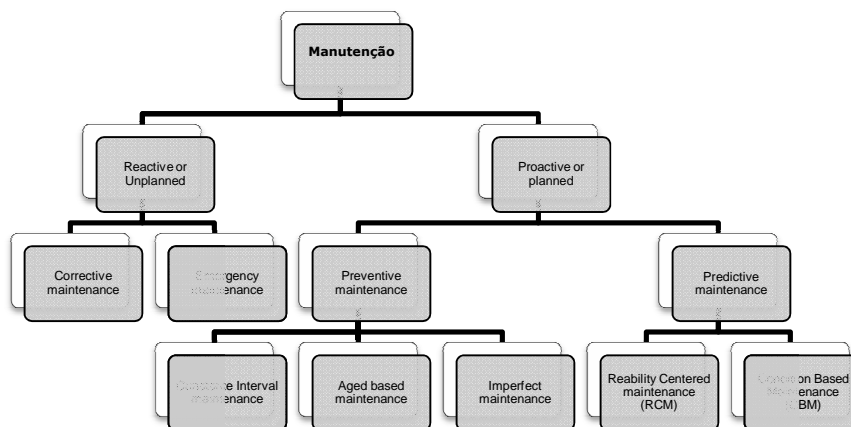


Figura 3- Taxinomia de filosofias de manutenção (Kothamasu, 2005)

Adoptada a taxinomia apresentam-se as definições propostas, complementadas por outras fontes. Primeiro há que distinguir entre manutenção reactiva e manutenção pró-activa.

a) Manutenção reactiva ou não planeada

No paradigma de manutenção reactiva ou não planeada a manutenção não é programada e somente é efectuada após a manifestação da avaria, defeito ou paragem do sistema, ou seja só reage ao acontecimento após a sua ocorrência. É a estratégia de manutenção mais antiga consistindo em “fix it when it breacks”, (Kothamasu, 2005).

A manutenção reactiva apresenta as vantagens de não implicar qualquer modelo prévio de análise ou de planeamento e de eliminar o risco de introdução de avarias que ocorrem quando se intervém num equipamento que está operacional. É apropriada para instalações com reduzido equipamento instalado e em que não exista uma total dependência na fiabilidade de um equipamento em particular (Jones, 1995, in Kothamasu, 2005, p.6). Pode também ser apropriada quando a taxa de avarias é mínima e da avaria não resultarem custos elevados ou sérias consequências em matéria de segurança (Kothamasu, 2005).

Os inconvenientes são os de obrigar à imobilização de recursos importantes em *stocks* de peças de reserva, necessitar do recurso frequente a trabalho extraordinário por não planeamento de períodos de imobilização dos sistemas e sobretudo a redução da disponibilidade e o aumento dos períodos de inactividade devido a avarias inesperadas que afectam o desempenho global do sistema. Para diminuir estas desvantagens é necessário dispor de bons meios de comunicação, de equipas bem treinadas e de um adequado apoio técnico e logístico (Kothamasu, 2005) (Didelet, 2003).

Esta técnica de manutenção será sempre usada, pelo menos, em situações em que não haja meios para prevenir a ocorrência da avaria, como é o caso da maior parte dos equipamentos electrónicos (Didelet, 2003).

Esta forma de manutenção é também designada noutras taxinomias por curativa ou correctiva. Kothamasu (Kothamasu et al, 2004, in Kothamasu, 2005) subdivide a manutenção reactiva em manutenção correctiva e em manutenção de emergência.

a.1. Manutenção reactiva correctiva

A manutenção correctiva define-se como a actividade realizada após uma avaria ocorrer e visa restaurar um item num estado que lhe permita cumprir a sua função (Knezevic, 1987; Saranga & Knezevic, 2000; Goplan & Kumar, 1995; in Kothamasu, p. 6). A manutenção correctiva apresenta um determinado grau de possibilidade de diferimento no tempo.

Deverá executada ASAP, “as soon as possible”. É o caso de uma “avaria” na chapa do automóvel.

a.2. Manutenção reactiva de emergência

A manutenção de emergência é definida como a actividade de manutenção que é necessário realizar imediatamente para evitar graves consequências (Kothamasu, 2005). Na manutenção de emergência não existe margem para que a intervenção de manutenção possa ser diferida no tempo, tendo de ser executada imediatamente. É o caso de uma fuga de óleo.

b) Manutenção pró-activa ou planeada

No paradigma de manutenção pró-activa age-se, executando as tarefas necessárias, antes que ocorra a avaria, minimizando-se os inconvenientes das estratégias de tipo reactivo.

A manutenção pró-activa pode ainda ser classificada em manutenção planeada preventiva e em manutenção planeada preditiva.

b.1. Manutenção pró-activa preventiva

A estratégia na manutenção preventiva ou sistemática consiste em planear a realização das acções de manutenção em intervalos periodicamente determinados para reduzir a probabilidade de falha ou degradação de desempenho, executando tarefas de manutenção como a lubrificação, a regulação, a substituição ou a revisão geral, sem o controlo prévio do estado do bem.

As intervenções de manutenção preventiva sistemática desencadeiam-se periodicamente, com base no conhecimento da regra de degradação aplicável e assumindo um determinado risco de avaria (Kothamasu, 2005).

Um exemplo típico de manutenção preventiva, são as operações de mudança e controlo do nível de óleo do motor e outros equipamentos do nosso automóvel, efectuadas de acordo com as instruções do fabricante.

Esta manutenção, que visa reduzir o risco de ocorrência de avarias, é adequada para órgãos, equipamentos ou sistemas que exibam um padrão de comportamento com certa regularidade, que permita estimar com algum rigor quando as suas características se vão degradar abaixo dos níveis mínimos aceitáveis. As vantagens deste tipo de manutenção

decorrem, essencialmente, do facto de ser planeada. Permite, por isso, uma redução do trabalho extraordinário, do tempo de imobilização de *stocks* e do número de paragens não planeadas (Didelet, 2003). Os seus inconvenientes são a redução da vida útil das peças ao substituí-las antes de avariarem, a incapacidade de prever a ocorrência da avaria e o risco de avaria induzida provocado por danos quando intervém (ou “quando se abre para ver se algo está mal”).

A manutenção preventiva pode ser dividida em manutenção a “*constante interval maintenance*”, “*age based maintenance*” e “*imperfect maintenance*”. A razão desta diferenciação deve-se à escolha da variável que determina os intervalos de manutenção pré-estabelecidos: calendário ou por tempo de funcionamento.

b.1.1. Manutenção pró-activa preventiva a intervalos constantes

A “*constante interval maintenance*” é uma manutenção sistemática efectuada em intervalos de tempo preestabelecidos. A definição dos intervalos de manutenção mais adequados é efectuada pesando a relação entre o aumento de risco de ocorrer uma avaria com intervalos longos e os custos elevados de manutenção preventiva decorrentes de intervalos curtos (Jardine, 1987 in Kothamasu, p. 7). É o exemplo do processo de revisão do automóvel baseado no tempo decorrido entre revisões.

b.1.2. Manutenção pró-activa preventiva age based maintenance

Na estratégia de manutenção preventiva “*age based maintenance*” a definição dos intervalos de intervenção de manutenção é efectuada com base nas horas de funcionamento ou operação do sistema. A manutenção preventiva “*é realizada somente após o sistema ter atingido uma determinada idade, digamos, 't'.* Se o sistema falhar antes de *t*, a acção de manutenção é efectuada e a próxima manutenção *t* é reagendada. Ao adiar o início das acções de manutenção, esta estratégia reduz o número de intervalos de manutenção em relação ao intervalo de manutenção constante” (Kothamasu, 2005, p.7). É o exemplo do processo de revisão do automóvel baseado no número de quilómetros percorridos entre cada revisão.

b.1.3. Manutenção pró-activa preventiva Imperfect maintenance

Kothamasu considera o conceito de manutenção imperfeita, deixando de o incluir em b.1.1 e em b.1.2, o que não acontece nas outras duas taxinomias, devido a “*A premissa de*

estratégias de manutenção imperfeita, considera que deve ser adicionado um certo grau de incerteza ao estado actual do equipamento, quando se agendam futuras actividades de manutenção. Isto porque o actual estado do sistema poderá situar-se entre o bom (original) e o ruim (avaria), mesmo após uma intervenção de manutenção. O intervalo predeterminado para a acção de manutenção é estimado a partir da distribuição da taxa de avaria, construída a partir de dados históricos extraídos do sistema ou fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos” (Kothamasu, 2005, p. 7).

b.2. Manutenção pró-activa preditiva

A manutenção preditiva difere da preventiva na programação das acções de manutenção. A manutenção preventiva é realizada em períodos mais ou menos fixos. Na manutenção preditiva a acção de manutenção é determinada adaptativamente.

São duas as tipologias de manutenção preditiva: Manutenção Baseada na Condição (CBM) e Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM, do inglês Reliability Centered Maintenance).

É objectivo deste trabalho avaliar a bondade de utilizar SEM para estabelecer políticas de manutenção baseadas em manutenção preditiva CBM.

b.2.1. RCM

A RCM foi originalmente desenvolvida na indústria aeronáutica, onde é crítica a relação entre o custo e a eficácia, pela necessidade de assegurar segurança e disponibilidade, minimizando os custos e os tempos de inactividade e ainda eliminando a possibilidade de ocorrência de avaria (Moss, 1985, in Kothamasu, p.11).

A RCM reúne duas tarefas: 1) analisar e categorizar os tipos de avarias tendo por base os seus efeitos no sistema e 2) avaliar o impacto dos programas de manutenção na fiabilidade. Primeiro identificam-se todos os tipos de avarias e prossegue-se com a categorização destas avarias com base nas consequências de cada uma. “ *A RCM, originalmente uma técnica de manutenção preventiva é cada vez mais uma filosofia de manutenção preditiva por via da introdução de técnicas de monitorização de condição na determinação do intervalo óptimo de manutenção*” (Kothamasu, 2005, p. 12).

Além da aviação outras indústrias revelam interesse nesta metodologia que exige grandes recursos para a sua implementação. É o caso da indústria das centrais nucleares (Nilsson, 2007), (Nilsson, 2009), pela procura de “avaria zero”.

Em suma, *“ este tipo de manutenção assenta no conceito de fiabilidade e em análises do tipo FTA (Failure Tree Analysis), FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) ou FMECA (Failure Mode on Effects and Critically Analysis) combinadas com uma avaliação do estado dos sistemas (obtida por métodos variados) antes de decidir, com base em critérios de custo-eficácia, que intervenções realizar”* (Vairinhos et al, 2009).

Komathamasu, (Kothamasu et al, 2005), não a menciona mas importa referir a Manutenção Baseada no Risco (**RBM**), a qual *“é uma variante da RCM que consiste numa atitude proactiva relativa à manutenção, assente em índices de risco operacional, riscos de segurança e custos (S, O, C – Security, Operational and Costs). Esta atitude proactiva traduz-se na busca, identificação e avaliação contínua dos riscos e sua classificação numa das categorias indicadas ou subcategorias apropriadas, e sua hierarquização As intervenções a realizar dependem de uma avaliação contínua desses índices de risco através, por exemplo, de cartas de controlo e de considerações de segurança, operacionais e de custos* (Vairinhos et al, 2009).

b.2.2. CBM

A expressão manutenção condicionada surgiu na década de setenta como um conceito para designar uma nova abordagem à manutenção preventiva *“que evoluiu do conceito de manutenção sistemática e em que, em vez de acções de manutenção em intervalos de tempo definidos, temos acções de inspecção em intervalos de tempo definidos”* (Kothamasu, 2005, p. 8).

As vantagens (ver Tabela 1) desta abordagem decorrem de a decisão de acção de manutenção assentar na observação do estado de condição do sistema. Na prática, medem-se com regularidade determinados parâmetros, detectam-se os sintomas de avarias, segue-se o seu desenvolvimento e com base nos valores obtidos pode-se extrapolar o momento em que se vão atingir níveis inaceitáveis e, portanto, quando se deve intervir (Cabral, 2006).

A avaria é prevista através da análise da degradação de características, indicadoras do estado de condição e obtidas por medição, observação ou análise, utilizando diversas

técnicas, tais como: a inspecção visual, a análise de óleos de lubrificação, a termografia, a análise de limalhas, a inspecção por ultra-sons, a inspecção radiográfica e a análise de vibrações.

Sendo um processo pró-activo, a CBM exige o desenvolvimento de um modelo preditivo que possa accionar o alarme para a acção de intervenção de manutenção. O modelo preditivo baseia-se em critérios de análise desenvolvidos a partir dos dados recolhidos pelo sistema. Em modelos sofisticados, além da capacidade avaliar o estado de condição actual, é incorporada a capacidade de predizer o estado futuro de um sistema com base em análises de prognóstico e de diagnóstico. Estes modelos usam dados históricos, dados actuais e recorrem a previsões efectuadas através de técnicas de modelação, assentes em métodos paramétricos ou não paramétricos (Kothamasu, 2005). O foco de muitos dos trabalhos actuais em CBM está no desenvolvimento de modelos com qualidades de precisão, robustez e capacidade de modelação autónoma, sendo frequente o objectivo de incorporar o factor humano na tomada de decisão, visando a aplicação de processos de melhoria contínua em interacção com os utilizadores dos sistemas (Christer & Wang, 1995; Scarf, 1997, Jarrel et al, 2002; Kothamasu, 2005; Ciarapica & Giacchetta, 2006; Han & Yang, 2006; Sun et al, 2006; Shi et al, 2007; Achermann, 2008; Jemec & Grum, 2009; Amirat et al, 2009; Dragomir et al, 2009; Vairinhos et al, 2009).

Em suma, na CBM:

“As intervenções a realizar devem ser as adequadas ao estado (ou condição) da máquina. O conhecimento (ou estimação) do verdadeiro estado da máquina pode ser difícil de obter apenas por métodos de observação não invasivos nem destrutivos. Contudo, os actuais sistemas de monitorização baseados em múltiplos sensores e na medição de vibrações, termografia e outros métodos, estão a permitir concretizar esta política de manutenção” (Vairinhos et al, 2009).

Em resumo, salientam-se os aspectos mais importantes da manutenção preditiva:

*“Seja qual for a política específica que for adoptada dentro destas grandes classes de políticas de manutenção – cuja característica comum é a de que o que há para fazer não depende necessariamente do calendário mas de um processo de decisão alimentado pelo **conhecimento** (ou estimativa) do estado da máquina específica a*

manter, por considerações de segurança, operacionais e económicas – o certo é que, especificada uma política, esta tem efeitos determinantes (não só afecta como determina ou é a causa) em quase todas as outras variáveis do sistema logístico, não só do material mas também financeiro e do pessoal.” (Vairinhos et al, 2009).

Tabela 1 - Vantagens da CBM (adaptado de Cabral, 2006, p. 219)

Controlar a condição das máquinas pode dar os seguintes benefícios:	Forma como os benefícios surgem:
Aumento da segurança do operador da máquina;	A previsão de avaria iminente, dada pelo controlo da condição, permite parar as máquinas antes de atingirem um estado crítico, em especial quando a paragem não é instantânea;
Aumento da disponibilidade dos equipamentos, resultando em maior produção a partir do capital investido;	A vida útil do material pode ser melhor aproveitada através da maximização do tempo entre revisões e ou redução do número de paragens;
Redução dos custos de manutenção;	A duração da revisão pode ser diminuída porque a natureza do problema é conhecida, os sobressalentes e o pessoal estão disponíveis; Os danos resultantes de avarias podem ser reduzidos ou eliminados; Existe melhoria nos procedimentos de diagnóstico, com redução do número de avarias imprevistas; A monitorização de certos parâmetros facilita a verificação de ausência de componentes críticos;
Maior eficiência na condução das instalações, permitindo regular o volume da produção às condições das instalações e atingir um nível de qualidade estável;	A carga e a velocidade de algumas máquinas podem ser variadas para obter um bom compromisso entre produção e tempo de serviço até à próxima beneficiação;
Maior capacidade de diálogo com os fabricantes das máquinas ou os reparadores, baseado nos conhecimentos obtidos com o controlo de condição;	A inspecção de um equipamento novo, no fim da garantia e depois das revisões, fornece bases de comparação úteis;
Melhores relações com os clientes devido à redução de paragens de produção imprevistas;	O sistema avisa em tempo a possibilidade de avaria eminente e com maior precisão;
Possibilidade de melhorar a especificação e o projecto de futuras instalações;	O histórico de conhecimento, obtido através das inspecções, pode servir para este fim.
Melhoria no controlo adaptativo, facilitando a optimização de processos.	

2.2 Modelação de Equações Estruturais, uma técnica de análise multivariada

O principal objectivo deste capítulo é revisitar a análise multivariada, enquadrando (SEM, do inglês Structural Equation Modelling), como método explicativo de análise multivariada com relações múltiplas entre as variáveis dependentes e independentes.

2.2.1. Análise multivariada

Por análise multivariada entende-se um conjunto de técnicas estatísticas para análise de múltiplas variáveis numa só relação ou num conjunto de relações, isto é, são métodos estatísticos que analisam em simultâneo medições múltiplas em cada indivíduo ou objecto da investigação.

2.2.2. Métodos de análise multivariada

Os métodos de análise multivariada podem ser divididos em dois grupos (ver Figura 4 - Métodos de análise multivariada), que resultam do tipo de relação que se procura explicar: a) os métodos explicativos, que procuram explicar as relações de dependência, ao descrever a estrutura dos resultados e, b) os métodos descritivos que visam explorar relações ou interdependências, modelando o fenómeno.

a) Métodos explicativos

Nas relações de dependência existe uma ou mais variáveis identificadas como dependentes a serem previstas ou explicadas por outras, as independentes. A preocupação é o estabelecimento de relações de causalidade, *“i.e., de como uma ou mais variáveis explicativas podem explicar o nível de uma ou mais variáveis explicadas. Esta estimação parte da especificação de um modelo baseado num conjunto de hipótese. A estimação do modelo permite aceitar ou rejeitar o modelo e portanto as hipóteses em que está baseado.* (Vilares & Coelho, 2005, p. 150). Hair (Hair et al, 2006, p. 14) indica oito métodos explicativos multivariados, sendo SEM um dos oito. É seguidamente efectuada uma síntese dos outros sete, sendo SEM desenvolvido *a posteriori*.

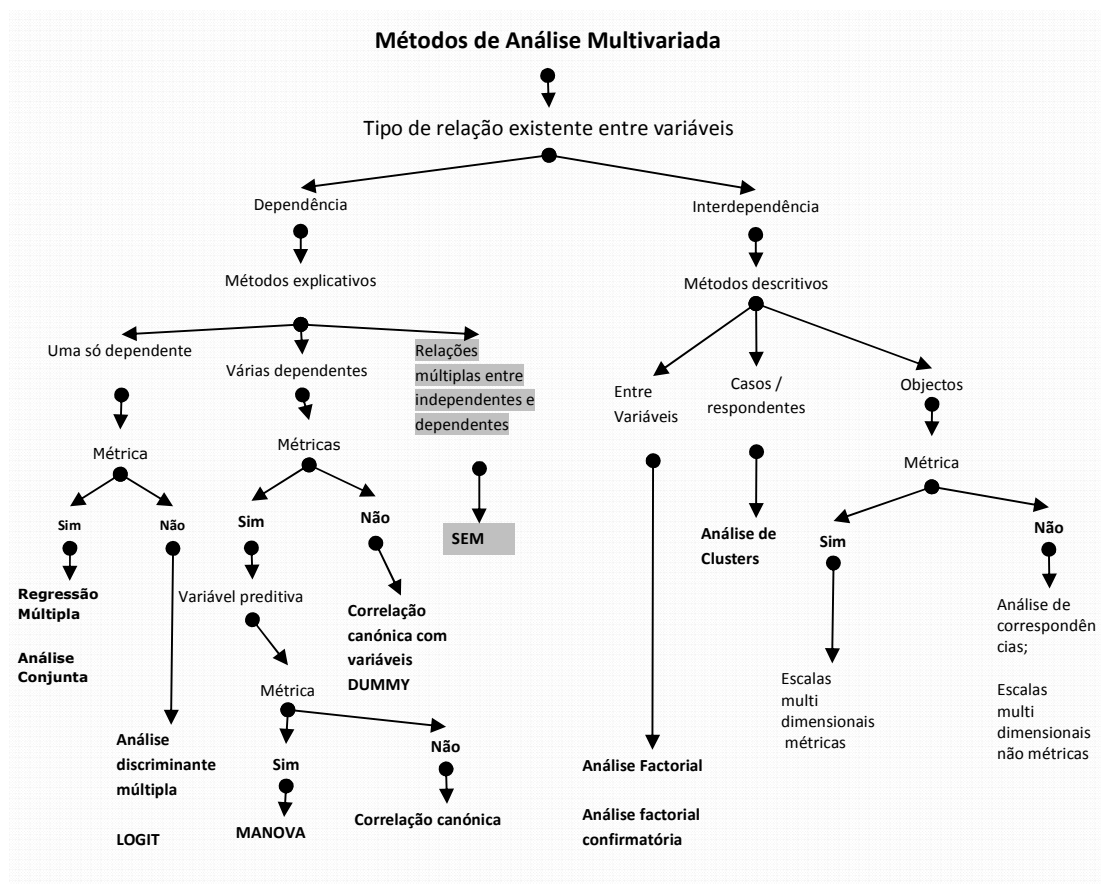


Figura 4 - Métodos de análise multivariada

(adaptado de (Hair, J.F., Black, W.C., & Babin, B.J., & Anderson, R.L., 2006, p. 151) e de (Vilares & Coelho, 2005, p. 15))

a.1. Regressão Múltipla

Metodologia apropriada quando o problema envolve uma só variável métrica dependente, que se presume relacionada com uma ou mais variáveis métricas independentes. O objectivo é prever as mudanças na dependente em resposta a alterações das independentes. (Hair et al, 2006, p. 176)

a.2. Análise Conjunta

Técnica de dependência “ baseada na estimação de modelos de regressão linear uni equacionais, em particular na regressão linear múltipla ou na regressão logística”, (Vilares & Coelho, 2006, p. 287). No âmbito dos estudos de mercado incorpora sofisticação à avaliação e desenvolvimento de novos produtos serviços ou ideias por conjugar a complexidade na

avaliação por parte do investigador com um contexto realista de decisão para o consumidor. Terminada a avaliação do consumidor, os resultados da análise conjunta podem ser usados para simular designs de um mesmo produto, contribuindo assim para a escolha do design óptimo.

a.3. Análise discriminante múltipla

Metodologia apropriada quando a única variável dependente é categórica (métrica ou não métrica). É utilizada quando a amostra total pode ser dividida em grupos, com base nas diferentes categorias da variável dependente. O objectivo é explicar as diferenças entre os grupos e ver com que probabilidade de um dado indivíduo irá pertencer a um dado grupo, em função dos valores assumidos pelas variáveis métricas independentes. (Salgueiro, 1995,p.7 ; Hair et al, 2006, p. 273).

a.4. Modelos de probabilidade linear (LOGIT)

São combinações entre a análise de regressão múltipla e a análise discriminante múltipla. A semelhança com a análise de regressão múltipla reside no facto de uma ou mais variáveis independentes serem usadas para prever uma só variável dependente. Porém a variável não é métrica. Estes modelos LOGIT distinguem-se da análise discriminante por se adaptarem a todos os tipos de variáveis independentes (métricas ou não métricas e por não exigirem o pressuposto da normalidade multivariada (Salgueiro, 1995, p. 7 ; Hair et al, 2006, p. 275).

a.5. Análise de variância multivariada

A MANOVA, do inglês Multivariate analysis of variance uma extensão da análise de variância univariada (ANOVA). Explora simultaneamente a relação entre diversas variáveis independentes categóricas e duas, ou mais, variáveis dependentes métricas. É particularmente útil quando o investigador desenha uma situação experimental para testar hipóteses que respeitem à variância em grupos de respostas a duas ou mais variáveis métricas (Salgueiro, 1995, p. 7 ; Hair et al, 2006, p. 283)

a.6. Correlação canónica

A correlação canónica é uma extensão da análise de regressão múltipla. O objectivo consiste em correlacionar simultaneamente várias variáveis métricas dependentes e independentes, desenvolver uma combinação linear de cada conjunto de variáveis

(dependentes e independentes) de forma a maximizar a correlação entre os dois conjuntos. Trata-se assim de obter o conjunto de pesos que permite maximizar a correlação simples entre o conjunto das variáveis dependentes e o das independentes. (Salgueiro, 1995, p. 7) (Hair et al, 2006, p. 14).

a.7. Correlação canónica com variáveis DUMMY

A abordagem é semelhante à anterior, mas utilizando variáveis DUMMY (Hair et al, 2006, p. 14).

a.8. SEM

O desenvolvimento desta metodologia é efectuado no capítulo seguinte.

b) Métodos descritivos

Nas relações de interdependência não existe a distinção entre variáveis dependentes e variáveis independentes, sendo analisadas como um conjunto único nas suas múltiplas relações, podendo ser divididos em:

b.1. Análise Factorial

Nesta metodologia o objectivo é reduzir a dimensão do espaço facilitando a interpretação, quando existem muitas inter-relações e muitas variáveis. A informação contida nas variáveis originais é condensada, com perda mínima de informação, nos factores (Hair et al, 2006, p. 107).

b.2. Análise factorial confirmatória

Esta metodologia utiliza técnicas de análise multivariada e de análise factorial para testar uma relação pré-especificada. *“Confirmatory factor analysis is a special type of factor analysis and is the first part of a complete test of a structural model... The CFA not only provide acceptable fit, but also must show evidence of construct validity”*. (Hair et al, 2006, p. 779)

b.3. Análise de Clusters

“Análise de clusters é um conjunto de metodologias de estatística multivariada que, a partir de um conjunto de informação sobre um grupo de entidades, procura organizá-las em grupos relativamente homogéneos, determinando uma estrutura de semelhanças/diferenças entre

as unidades... Subjacente está a ideia de que objectos semelhantes em termos das variáveis utilizadas irão ter comportamentos semelhantes.” (Bação, 2006, p. 106).

b.4. Escalamento multidimensional, (variáveis métricas e não métricas)

O escalamento multidimensional (MDS, do inglês multidimensional scaling) é um conjunto de técnicas que ajudam à identificação das dimensões chave relativas aos atributos dos objectos. *“Por exemplo, no marketing o objectivo é transformar os julgamentos dos indivíduos (em termos de semelhanças ou preferências por uma dada marca, loja, produto) em distâncias representadas num espaço multidimensional. O mapa resultante mostra o posicionamento relativo de todos os objectos e permite a identificação das dimensões subjacentes aos julgamentos desses indivíduos.” (Hair et al, 2006: p. 629)*

b.5. Análise das correspondências

A análise das correspondências (CA, do inglês correspondence analysis) é uma técnica que facilita a redução em termos de dimensões de classificação de objectos, como é o caso do mapa percentual dos objectos em relação aos seus atributos. A CA emprega uma tabela de contingência, que cruza duas ou mais variáveis categóricas. Transforma depois os dados não métricos em métricos, procede a uma redução dimensional, semelhante à análise factorial e constrói um mapa de percepções, semelhante ao escalamento multidimensional. Permite, assim uma representação multivariada das interdependências para dados não métricos. (Hair et al, 2006: p. 663)

2.3. Metodologia. Structural Equation Modeling

SEM, é uma metodologia de análise multivariada caracterizada pela existência de relações múltiplas entre variáveis dependentes e independentes, sendo muito adequada no estudo de fenómenos complexos, que envolvam uma multiplicidade de variáveis. Donde, a sua aplicação no estudo de fenómenos sociais, nomeadamente na psicologia, biometria, econometria, sociologia e marketing. *“A sua recente aplicabilidade aos estudos de satisfação do cliente veio reavivar o seu interesse, afigurando-se particularmente poderosa para estimar as relações entre a satisfação e lealdade dos clientes das empresas e o seu desempenho financeiro”* (Vilares & Coelho, 2005, p. 246).

O principal objectivo deste capítulo é proporcionar uma visão global da metodologia SEM, em consonância com as etapas apresentadas na Figura 5 - Etapas para a construção de um modelo de equações estruturais. Decorrentes deste objectivo, estão a explicitação dos conceitos chave e a apresentação da notação utilizada, utilizando como principal referência metodológica (Vilares & Coelho, 2005, p. 245:291).

2.3.1. “Overview”

As origens SEM remontam à “path analysis”, desenvolvida pelo geneticista Sewall Wright, onde podemos identificar três ideias principais: a) o diagrama causal; b) a decomposição das covariâncias e correlações em parâmetros do modelo e c) a existência de efeitos directos, indirectos e totais, entre variáveis. A “path analysis” (análise de trajetórias) caracteriza-se por abordar os problemas de dependência entre variáveis, típicos da regressão, com a possibilidade de incluir, duas ou mais equações de regressão, na modelação do fenómeno em análise. Por outro lado, os problemas de regressão são representados, sucintamente, através de um “diagrama de trajetórias”, onde são nítidas as associações existentes entre as variáveis observáveis. O refinamento destas propriedades da “path analysis” conduziu à metodologia SEM, que reúne as seguintes vantagens:

1) A capacidade de especificar, estimar e testar relações hipotéticas entre um grupo de variáveis. Deste modo, nas ciências sociais permite-se a inclusão de conceitos sociais abstractos, sob a forma de variáveis latentes, construídas a partir de variáveis observáveis que lhes servem de indicadores, podendo as variáveis latentes estar correlacionadas entre si (Bentler & Wu, 2002);

2) A possibilidade de todas as relações existentes entre variáveis, latentes ou indicadoras, serem representadas por equações estruturais lineares (ou transformadas em lineares) (Bollen, 1989);

3) A tradução das relações entre variáveis sob a forma de um diagrama, o que possibilita uma representação mais clara do fenómeno em estudo, sendo esta a principal “mais-valia” SEM (Kaplan, 2000), (Kline, 1998);

4) A possibilidade de analisar diversas relações de dependência entre variáveis, incluindo a hipótese de uma variável dependente de uma equação ser independente noutra. De facto, à semelhança doutras técnicas de análise multivariada, como a Análise Factorial (AF) e a Análise de Regressão (AR), a metodologia SEM consiste em testar a plausibilidade de um modelo, construído a partir de uma teoria que sustenta o fenómeno em estudo. Contudo, a AF e a AR, caracterizam-se por contemplar múltiplas variáveis independentes, admitindo somente uma única relação entre as variáveis dependentes e independentes. Já na metodologia SEM, ultrapassa-se esta restrição, permitindo relações múltiplas entre variáveis (latentes ou indicadoras), sejam elas dependentes ou independentes (Kline, 1998).

2.3.2. Metodologia

SEM assenta em relações causais, que são representadas por um diagrama causal. O investigador tem de especificar essas relações, definindo quais as variáveis dependentes e independentes. A escolha das variáveis e das relações causais é efectuada com base na justificação teórica que suporta a análise do fenómeno em investigação (passo 1., Figura 5), sendo necessário identificar as variáveis latentes, especificar o modelo estrutural (relações entre variáveis latentes) identificar e caracterizar os indicadores que entram na formação ou são reflexo das variáveis estruturais e especificar o modelo observacional que liga as variáveis indicadoras às estruturais (Bollen, 1989) (passo 2, Figura 5). O modelo é depois confirmado ou não pelos resultados da estimação do modelo estrutural com base em dados experimentais (passo 3, Figura 5). O SEM obtido serve assim para testar as relações hipotéticas existentes entre um grupo de variáveis (Bollen, 1989).

A forma como o modelo teórico é construído tem riscos associados. A sobre identificação (do inglês, overfitting) e a pouca generalização podem ocorrer, devido à grande flexibilidade da metodologia. Os modelos devem ser concisos pela dificuldade de

interpretação dos resultados quando o número de conceitos é elevado, (mais de vinte). Por outro lado, a omissão de uma ou mais variáveis chave explicativas podem conduzir ao enviesamento da importância de outras variáveis (Salgueiro, 1995).

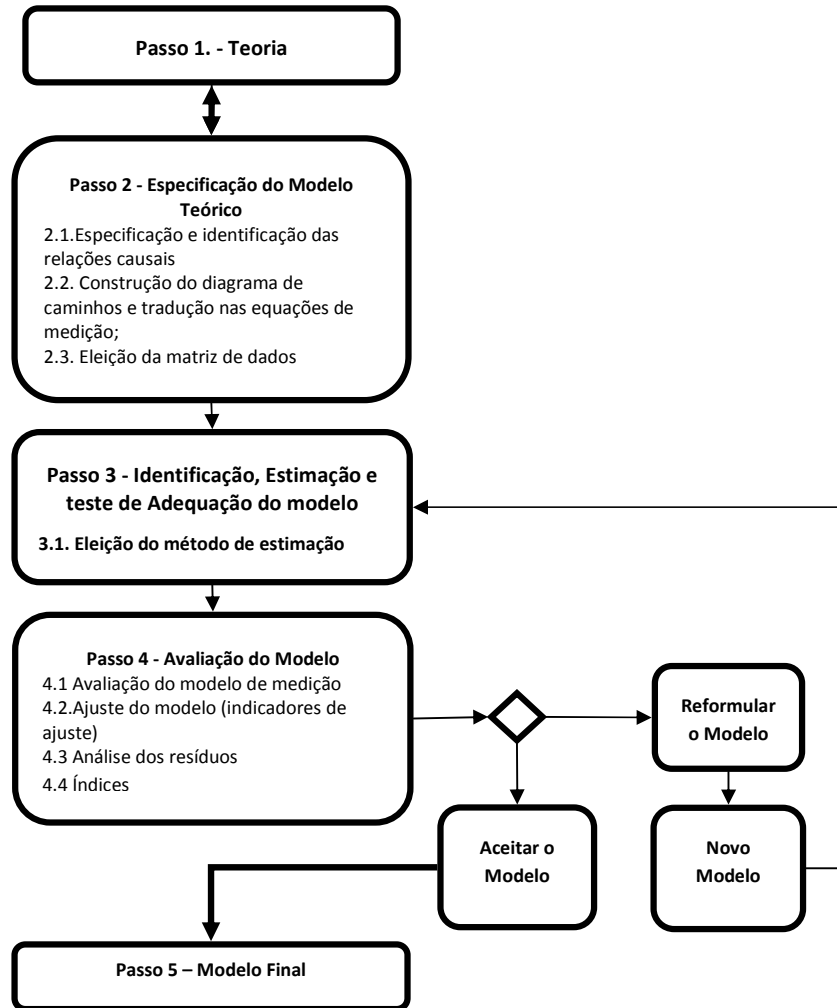


Figura 5 - Etapas para a construção de um modelo de equações estruturais

(adaptado de (Hair et al, 2006, p.759) e (Vilares & Coelho, 2005, p. 251))

2.3.3. Tipos de variáveis

Como já referido, na metodologia SEM utilizam-se dois tipos de variáveis:

a) Variáveis latentes, que não são directamente observadas, sendo apenas objecto de observação as manifestações destas variáveis. “Incluem-se neste grupo, variáveis como a inteligência ou a qualidade dos produtos e serviços que não são observadas. Já os testes de

QI podem ser considerados como uma manifestação da inteligência” (Vilares & Coelho, 2005, p. 246). As variáveis latentes são um dos contributos dos modelos SEM, constituindo a sua “imagem de marca”. As variáveis latentes podem ser endógenas, explicadas pelo modelo ou exógenas, quando não explicadas pelo modelo; e

b) Variáveis de medida. Estas variáveis constituem os indicadores utilizados para medir indirectamente as variáveis latentes. Também as variáveis de medida podem ser classificadas em endógenas e exógenas.

2.3.4. Modelo estrutural e modelo de medida

O modelo de equações estruturais é composto por dois sub modelos: a) O Modelo estrutural, constituído pelas equações que definem as relações entre as variáveis latentes; e b) O Modelo de medida, constituído pelas equações que relacionam as variáveis latentes com a variáveis de medida.

a. Modelo estrutural

O modelo estrutural define a relação entre as variáveis latentes exógenas e endógenas. Neste modelo especificam-se quais as variáveis latentes (exógenas) que influenciam directa ou indirectamente mudanças nos valores da(s) outra(s) variáveis latentes (endógenas ou dependentes). A parte estrutural fundamenta-se no cálculo de sistemas de equações simultâneas. É no modelo estrutural que estão contidos os procedimentos de especificação e estimação das associações das variáveis latentes entre si ou com outras observáveis, descrevendo os seus efeitos e respectivas intensidades. O modelo estrutural inclui, as informações sobre a variância explicada e a variância não explicada de cada variável endógena considerada no modelo (Kaplan, 2000) (Vilares & Coelho, p. 248-250).

As equações de um modelo estrutural, com g número de variáveis endógenas e k número de variáveis exógenas, apresentam a seguinte forma condensada:

$$\eta = \beta\eta + \gamma\xi + \nu$$

Onde η é um vector ($g \times 1$) das variáveis endógenas, ξ é um vector ($k \times 1$) das variáveis exógenas, β é uma matriz ($g \times g$) e γ é uma matriz ($g \times k$) dos parâmetros designados coeficientes de impacto e ν é o vector ($g \times 1$) dos resíduos aleatórios.

Na Figura 6 exhibe-se a representação gráfica de um modelo estrutural com duas variáveis exógenas e duas variáveis endógenas. A vantagem desta representação gráfica SEM é

imediate, permitindo identificar claramente: 1) a direcção de causalidade, que é da esquerda para a direita; 2) os impactos directos, das variáveis exógenas nas variáveis endógenas; 3) os impactos directos de variáveis endógenas noutras variáveis endógenas; 4) os impactos indirectos entre variáveis, o que permite o calculo do impacto total. No caso, o impacto total de ξ_1 em η_2 é a soma do impacto directo medido por γ_{12} , somado com o impacto indirecto que resulta do impacto medido por γ_{11} (de ξ_1 em η_1) e de β_{12} (impacto directo de η_1 em η_2); 4) as covariâncias entre variáveis exógenas; 5) a contribuição do conjunto dos determinantes da respectiva variável endógena não considerados especificamente no modelo (v_1 e v_2) (o valor esperado de cada um dos erros deve ter média nula se o modelo estiver bem especificado).

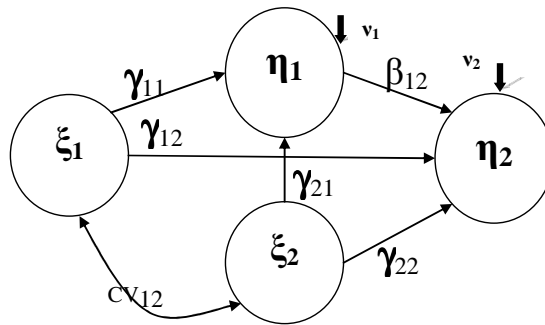


Figura 6 - Modelo estrutural com duas variáveis endógenas e duas variáveis exógenas

Donde resultam as seguintes formulas:

$$\eta_1 \equiv \gamma_{11} \xi_1 + \gamma_{21} \xi_2 + v_1$$

$$\eta_2 \equiv \beta_{12} \xi_1 + \gamma_{12} \xi_1 + \gamma_{22} \xi_2 + v_2$$

b. Modelo de medida

O modelo de medida associa cada variável latente a um conjunto de indicadores empíricos, as variáveis de medida, directamente observáveis e medidas. Cada uma das variáveis latentes é formada ou é reflectida pelas variáveis observáveis, o que é efectuado através da realização de análise factorial confirmatória, que determina a forma como as variáveis latentes são medidas a partir das variáveis observadas. Este (sub) modelo fornece ainda uma descrição das propriedades de medida (validade e fiabilidade) das variáveis observadas.

O modelo de medida pode ter três especificações: 1) modelos reflectivos, 2) modelos formativos e 3) modelos mistos, correspondendo a modos de relacionamento distintos entre as variáveis latentes e as de medida.

b.1. Modelo reflectivo

Um modelo reflectivo, com g número de variáveis endógenas e k número de variáveis exógenas, apresenta a seguinte forma matricial:

$$y_i = \lambda_{yi} \eta_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, g$$

$$x_j = \lambda_{yj} \xi_j + \delta_j, j = 1, 2, \dots, k$$

Onde: λ_{yi} é o vector dos pesos de dos g_i indicadores das variáveis endógenas η_i e ε_i é o vector dos g_i resíduos destas equações; ξ_j é o vector dos pesos dos k_j indicadores associados às variáveis exógenas ξ_j e δ_j é o vector dos resíduos destas equações;

Uma representação gráfica global de um modelo estrutural com duas variáveis exógenas e duas variáveis endógenas, com quatro modelos reflectidos é apresentada na Figura 7.

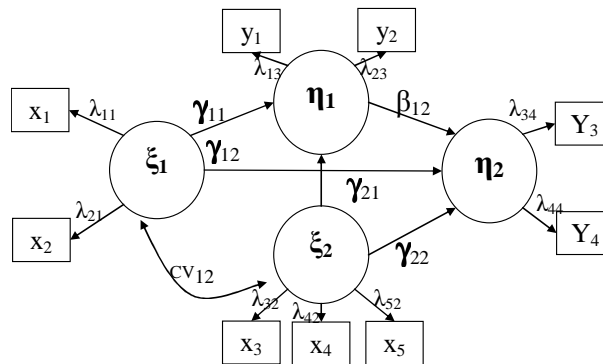


Figura 7 – Modelo Reflectivo

b.2. Modelo Formativo

Um modelo formativo, com g número de variáveis endógenas e k número de variáveis exógenas, apresenta a seguinte forma matricial:

$$\eta_i = \sum_{i=1}^g \lambda_{\eta i} y_i + \delta_{\eta i}, i = 1, 2, \dots, g$$

$$\xi_j = \sum_{j=1}^k \lambda_{\xi j} x_j + \delta_{\xi j}, j = 1, 2, \dots, k$$

Em que cada variável endógena η_i é formada a partir de g_i variáveis de medida e cada variável exógena ξ_j formada a partir de k_j variáveis de medida, sendo g o número de variáveis endógenas, k o número de variáveis exógenas.

Uma representação gráfica global de um modelo estrutural com duas variáveis exógenas e duas variáveis endógenas, com quatro modelos formativos é apresentada na Figura 8.

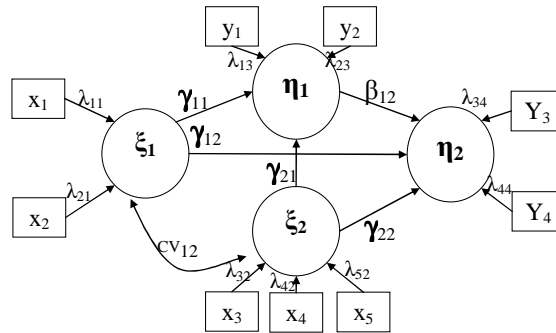


Figura 8 – Modelo Formativo

b.3. Modelo Misto

Os modelos mistos conjugam as duas situações anteriores, apresentando-se um exemplo na Figura 9. Neste exemplo, os dois modelos formativos ilustram as relações existentes entre cada variável latente exógena com as respectivas variáveis indicadoras. Por seu lado, os dois modelos reflectivos ilustram as relações existentes entre cada uma das variáveis latentes endógenas com as respectivas variáveis indicadoras.

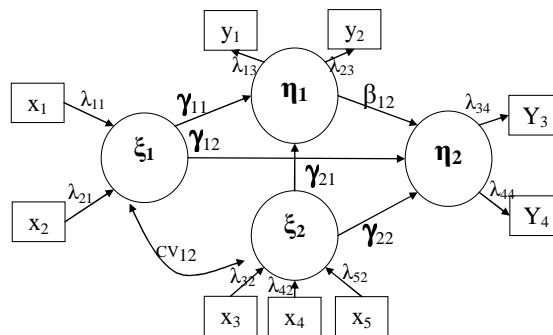


Figura 9 – Modelo Misto

2.3.5. Identificação, estimação e teste de adequação do modelo

Percorridos os passos um e dois da metodologia, e analisado o seu conteúdo prossegue-se agora para a exploração dos passos três e quatro.

Um modelo está identificado se for teoricamente possível obter uma estimativa única para cada um dos parâmetros que devem ser calculados. Como acontece com a resolução de qualquer sistema de equações lineares, é necessário que exista compatibilidade entre o número de parâmetros desconhecidos (aqueles que devem ser estimados pelo modelo) e o número de parâmetros conhecidos (que se relaciona com a quantidade de variáveis observáveis que o compõem). O resultado do sistema de equações tem de ser possível e determinado.

Para estimar estes modelos existem diversos métodos e produtos informáticos. O LISREL (Linear Structural Relations) é, porventura, o software mais conhecido e utiliza métodos baseados na minimização da diferença entre a matriz das covariâncias ou correlações da amostra e a matriz correspondente do modelo teórico. Este método é o mais generalizado, sendo utilizado por outros produtos, como o AMOS, Ramona e EQS. Segundo (Vilares & Coelho, 2005, p. 258):

“A utilização destes métodos fornece estimadores para os parâmetros que são consistentes, assintoticamente, não enviesados e eficientes...estas propriedades só são verificadas ... se as variáveis de medida seguirem uma distribuição normal e se dispuser de uma amostra de grande dimensão. A não verificação destas hipóteses justificará, segundo Fornell e Bookstein (1982, p. 449), as razões que levam estes métodos a gerar soluções inadmissíveis, ou seja soluções fora dos intervalos admissíveis ... por outro lado ... não garantem soluções únicas para os valores das variáveis latentes ... Acresce que o modelo tem de ser reflectivo ... pois, caso contrário, não é possível explicar as covariâncias de todos os indicadores”.

No presente trabalho a modelação é efectuada utilizando o software SmartPLS, (Institute of Operations Management and Organizations 2008), o qual recorre à metodologia PLS (Partial Least Squares) ou dos Mínimos Quadrados Parciais. As razões para esta escolha resultam dos constrangimentos referidos anteriormente. Por um lado os dados não têm distribuições normais, por outro a amostra tem redundância e por fim o modelo não é puramente reflexivo.

“O PLS centra-se no cálculo de estimadores para as variáveis latentes. Em vez de procurar explicar as covariâncias de todos os indicadores, os estimadores fornecidos pela

metodologia PLS são obtidos através da minimização das variâncias dos resíduos das variáveis dependentes ou endógenas quer se trate de variáveis latentes ou de variáveis de medida. A estimação de um modelo, através da metodologia PLS, comporta duas grandes etapas. Na primeira são estimados os valores das variáveis latentes e na segunda etapa, os valores das variáveis latentes são substituídos no modelo estrutural e no modelo de medida, sendo estimados estes dois modelos.” (Vilares & Coelho, 2005, p. 259).

2.3.6. Medidas de adequação do modelo metodologia PLS

Na estimação dos parâmetros, a metodologia PLS não assume hipóteses sobre a distribuição das observações e dos erros do modelo adoptado, pelo que os testes tradicionais baseados na teoria do χ^2 não são apropriados. (Vilares & Coelho, p. 97) sugerem a utilização de medidas e técnicas não paramétricas (em que não se assumem distribuições de probabilidade para os estimadores dos parâmetros).

As medidas propostas (R^2 e AVE) destinam-se a analisar a qualidade do ajustamento e a capacidade de previsão do modelo. As técnicas propostas destinam-se a testar a estabilidade das estimativas dos parâmetros (Jackknifing e Bootstrapping).

2.3.6.1. Coeficiente de Determinação R^2

O impacto da variação do coeficiente R^2 permite analisar o impacto de uma variável latente na explicação de uma outra variável latente dependente. Esse impacto é medido através de f^2 cuja expressão é dada por:

$$f^2 = \frac{R_i^2 - R_e^2}{1 - R_e^2}$$

Valores de f^2	Impacto da variável independente na explicação da variável dependente:
Próximos de 0,02	Baixo
Próximos de 0,15	Médio
Próximos de 0,35	Alto

R_i^2 e R_e^2 são os valores de R^2 conforme a variável latente é incluída ou excluída da variável a estimar.

2.3.6.2. Variância Média Extraída (AVE)

Esta medida procura medir a parte da variância total de um indicador ou variável de medida explicada por uma dada variável latente. Neste âmbito, indica a proporção do conjunto das variâncias dos indicadores usados num dado bloco que é explicada pela variável latente associada a esse bloco.

$$AVE = \frac{\sum \lambda_i^2}{\sum \lambda_i^2 + \sum \text{var}(\varepsilon_i)}$$

Valores de AVE pelo menos iguais a 0,5 são recomendados, para assegurar que pelo menos 50% da variância dos indicadores é explicada.

2.3.6.3. Jackknifing

O Jackknifing (Efron & Tibshirani, 1993), é uma técnica que permite obter estimativas mais robustas para os parâmetros, basicamente através da repetição dos cálculos usando amostras ligeiramente diferentes. De facto, o “Jackknifing pertence a um conjunto de técnicas que avalia a estabilidade e a significância das estimativas dos parâmetros mais pela variabilidade da amostra do que pela formulação de hipóteses sobre os parâmetros” (Vilares & Coelho, 2005, p. 268).

2.3.6.4. Bootstratiping

Ainda segundo Vilares e Coelho o “bootstraping apresenta outra abordagem não paramétrica para estimar a precisão dos estimadores PLS. Segundo esta abordagem são geradas k amostras que permitem calcular k estimativas para cada parâmetro do modelo. Cada amostra (de dimensão n) é gerada, através da extracção com reposição da amostra original (também de dimensão n). Seguidamente, procede-se de modo semelhante à abordagem Jackknifing.

A técnica jackknife tende a demorar menos tempo mas também é vista como menos eficiente. Em geral, os erros padrão do bootstrap e do jackknife tendem a convergir.” (Vilares & Coelho, 2005, p. 270)

3. Metodologia. Aplicação a um motor marítimo de propulsão

Nos capítulos anteriores é efectuada uma síntese dos principais conceitos presentes quando se abordam as temáticas CBM e SEM. Tal deve-se a ser objectivo deste trabalho avaliar a bondade de aplicar SEM a sistemas mecânicos no contexto CBM. No presente capítulo é inicialmente proposto o modelo e explicitado o seu racional teórico. Seguidamente, é efectuada a aplicação experimental do modelo utilizando dados artificiais e dados reais.

Relembrando, no primeiro passo especificam-se as relações entre as variáveis que compõem o modelo. Nesta etapa, expressam-se as hipóteses teóricas sob a forma de um sistema de equações e em seguida constrói-se o diagrama. Ao invés, é possível iniciar o processo de especificação com a construção da representação gráfica e depois traduzi-lo sob a forma de uma série de equações. Neste trabalho foi seguida a segunda opção. O diagrama do modelo proposto é apresentado na Figura 10.

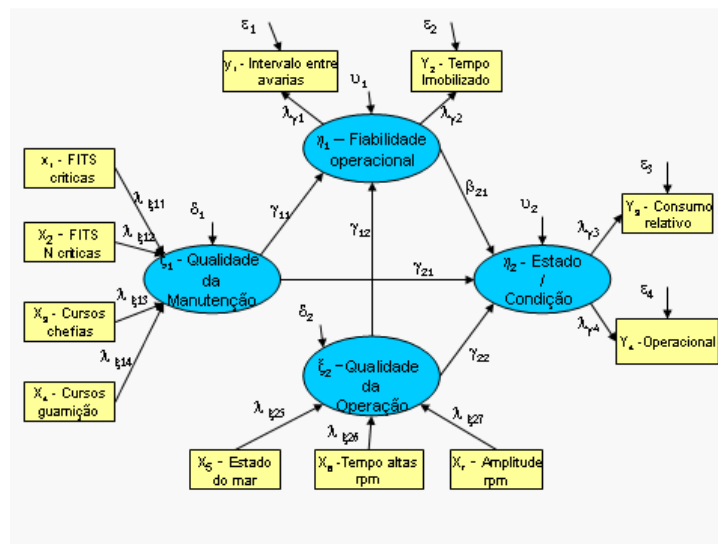


Figura 10 - Modelo proposto para um motor marítimo de propulsão

O sistema de equações que traduz este modelo é o seguinte:

Modelo estrutural:

$$Fiab_operacional = \gamma_{11}Qual_manutenção + \gamma_{12}Qual_operação + v_1$$

$$Estado_condição = \gamma_{21}Qual_manutenção + \gamma_{22}Qual_operação + \beta_{21}Fiab_operacional + v_2$$

Modelo de medida (incluindo um modelo formativo e um modelo reflectivo):

Modelo formativo:

$$Qual_manutenção = \lambda_{11}FITS_criticas + \lambda_{12}FITS_ncriticas + \lambda_{13}Cursos_chefias + \lambda_{14}Cursos_guarnição + \delta_1$$

$$Qual_operação = \lambda_{25}Estado_mar + \lambda_{26}Tempo_altas_rpm + \lambda_{27}Amplitude_rpm + \delta_2$$

Modelo reflectivo:

$$Intervalo_entre_avarias = \lambda_{y1}Fiabilidade + \varepsilon_1$$

$$Tempo_imobilizado = \lambda_{y2}Fiabilidade + \varepsilon_2$$

$$Consumo_relativo = \lambda_{y3}Estado_condição + \varepsilon_3$$

$$Operacional = \lambda_{y4}Estado_condição + \varepsilon_4$$

O racional teórico para a construção deste modelo assenta na ideia de que o estado “on condition” é possível ser caracterizado a partir de um modelo estrutural de variáveis latentes.

Duas das variáveis latentes são endógenas:

A variável Estado de condição (EC), por analogia com a ciência médica, tenta avaliar a saúde global do equipamento. É uma variável latente endógena, sendo a mais importante do modelo estrutural e servirá para decidir sobre a necessidade de realizar uma intervenção de manutenção. O Estado de condição é um conceito teórico, intangível, não directamente medido ou observável. Deste modo, EC manifesta-se através de duas variáveis observáveis: y3 – Consumo relativo (por relação com os valores normais definidos) e y4- Situação operacional (analisando se equipamento está ou não operacional). EC, é influenciada directa e indirectamente pelas outras três variáveis latentes.

A variável Fiabilidade operacional (FO) tenta representar quão apto está o equipamento para o desempenho da sua função. É uma variável latente endógena. A FO é um conceito teórico, intangível, não directamente medido ou observável, mas manifesta-se através de duas variáveis observáveis: y1 – Intervalo entre avarias e y2- Tempo imobilizado. FO sofre impactos de outras duas variáveis latentes: QM e QO.

As outras duas variáveis latentes são exógenas:

A Qualidade de manutenção (QM) visa representar quão bem um equipamento é mantido. É um conceito não directamente observável, formada a partir de quatro variáveis indicadoras. Duas delas, x1 e x2, relacionadas com a execução de um calendário pré-estabelecido de rotinas de manutenção (FITS³ críticas e FITS não críticas). As outras duas variáveis relacionadas com a quantidade de formação específica das pessoas que directamente operam com o equipamento (x3 e x4). Assim, considera-se que quanto mais formação específica existir melhor será QM.

³ FIT – ficha de trabalho

A Qualidade operacional (QO) visa representar a adversidade a que o equipamento é sujeito. É igualmente um conceito intangível, relacionado com a adversidade a que o equipamento é sujeito. Crê-se, que QO resulta de três variáveis indicadoras directamente observáveis. Uma relacionada com a adversidade climática (x5 – Estado do mar), as outras duas relacionadas com a operação humana (x6 – quantidade de tempo a altas ou baixas RPM⁴ e x7 – variação de RPM).

Deste modo, o modelo de medida é misto sendo constituído por dois modelos formativos relacionados com as variáveis latentes exógenas e por dois modelos reflexivos relacionados com as variáveis latentes endógenas. As respectivas variáveis observáveis são apresentadas nas Tabela 2 e Tabela 3.

Variável latente: Fiabilidade Operacional			
Variáveis observáveis	Valor da escala	Variáveis observáveis	Valor da escala
y1 - Intervalo entre avarias		y2 - Tempo Imobilizado	
Anual	4	0 - 7 dias	4
Semestral	3	7 - 15 dias	3
Trimestral	2	15 - 30 dias	2
Mensal	1	30 - 45 dias	1
Inexistente	0	> 45 dias	0
Variável latente: Estado de Condição			
Variáveis observáveis	Valor da escala	Variáveis observáveis	Valor da escala
y3 - Consumo relativo		y4 - Estado Operacional do motor	
Normal	4	Sem limitações	4
Alto	3	Com Limitações	3
Elevado	2	Degradado	2
Exagerado	1	Muito degradado	1
Não admissível	0	INOP	0

Tabela 2 – Variáveis Latentes endógenas e variáveis observáveis associadas

⁴ RPM – rotações por minuto.

Variável latente: Qualidade da Manutenção			
Variáveis observáveis	Valor da escala	Variáveis observáveis	Valor da escala
x1 - FITS críticas em atraso		x3 - % de membros com os cursos recomendados (chefias)	
> 60 dias	0	<25	0
30-60 dias	1	25-50	1
15-30dias	2	50-75	2
7-15dias	3	75-90	3
0-7dias	4	90-100	4
Variáveis observáveis	Valor da escala	Variáveis observáveis	Valor da escala
x2 - FITS não críticas em atraso		x4- % de membros com os cursos recomendados (guarnição)	
> 60 dias	0	<25	0
30-60 dias	1	25-50	1
15-30dias	2	50-75	2
7-15dias	3	75-90	3
0-7dias	4	90-100	4
Variável latente: Qualidade da Operação			
x5 - Estado do mar			Valor escala
Designação / Nº da Escala de Douglas		Altura da vaga (m)	
ESTANHADO	0	0	9
MAR-CHÃO	1	0-0,1	8
ENCRESPADO	2	0,1-0,5	7
PEQUENA VAGA	3	0,5 - 1,25	6
CAVADO	4	1,25 - 2,5	5
GROSSO	5	2,5 - 4	4
ALTEROSO	6	4 - 6	3
TEMPESTUOSO	7	6-9	2
ENCAPELADO	8	9 - 14	1
EXCEPCIONAL	9	> 14	0
Variáveis observáveis	Valor da escala	Variáveis observáveis	Valor da escala
x6 - Tempo em altas rotações (rpm)		x7 - Amplitude de variação rpm	
Não utilizado	4	Não utilizado	4
< 0,5 hora	3	Aconselhado	3
0,5 - 1 hora	2	Aceite	2
1 - 1,5 hora	1	Admissível	1
> 1,5 hora	0	Não admissível	0

Tabela 3 – Variáveis Latentes exógenas e variáveis observáveis associadas

Para a estimação do modelo é utilizado o software SmartPLS, (Institute of Operations Management and Organizations 2008), o qual recorre à metodologia PLS (Partial Least Squares) ou dos Mínimos Quadrados Parciais, conforme já referido anteriormente. O conteúdo de um relatório tipo deste software apresenta-se no Anexo 1.

3.1. Aplicação experimental do modelo proposto

O modelo foi aplicado experimentalmente utilizando 1) dados artificiais e, 2) dados reais.

3.1.1. Aplicação experimental do modelo proposto com dados artificiais

A utilização de dados artificiais foi efectuada como o objectivo de apresentar uma comunicação na JOCLAD 2009, por não se disporem à data de dados reais. Assim, o trabalho foi efectuado de acordo com as seguintes etapas:

Primeiro: foi estabelecida uma Tipologia com sete tipos de estados de condição, conforme indicado na Tabela 4. Para a caracterização quantitativa padrão de cada um dos sete tipos foi seguida a seguinte metodologia:

- 1) Atribuição, a priori de valores para: as variáveis observáveis ou indicadoras (Tabela 5), para os coeficientes de impacto do modelo estrutural (Tabela 6), e dos coeficientes de impacto dos dois modelos formativos (Tabela 7);
- 2) No modelo de medida formativo foram utilizados os valores da Tabela 5., e os valores dos coeficientes de impacto da Tabela 7 obtendo-se os valores “teóricos” das variáveis latentes exógenas;
- 3) Obtidos os valores das variáveis exógenas, no modelo estrutural, calcularam-se os valores das variáveis latentes endógenas utilizando os valores dos coeficientes de impacto da Tabela 6, obtendo-se os valores indicados na Tabela 4, caracterizadores de cada tipo de Estado de Condição;
- 4) Finalmente, nos dois modelos de medida reflectivos, obtiveram-se os valores dos respectivos impactos (ver Tabela 8 - Modelo reflectivo - coeficientes de impacto).

VARIÁVEIS	ESTADOS DE CONDIÇÃO						
	Ótimo	Muito Bom	Bom	Satisfatório	Não Aconselhado	Não Aceitável	INOP
QM	4,3	3,3	3	2	1,3	1	0
QO	3,36	2,46	2,46	1,6	0,79	0,78	0
FO	3,612	2,0295	1,845	0,8	0,25675	0,195	0
E/C	2,92572	1,6439	1,49445	0,648	0,2079675	0,15795	0
y1	0,806	1,01475	0,9225	0,4	0,128375	0,0975	0
y2	0,806	1,01475	0,9225	0,4	0,128375	0,0975	0
y3	0,46286	0,8219475	0,747225	0,324	0,10398375	0,078975	0
y4	0,46286	0,8219475	0,747225	0,324	0,10398375	0,078975	0

Tabela 4 - Tipologia dos estados de condição

VARIÁVEIS	ESTADOS DE CONDIÇÃO						
	Ótimo	Muito Bom	Bom	Satisfatório	Não Aconselhado	Não Aceitável	INOP
x1	5	4	3	2	2	1	0
x2	4	3	3	2	1	1	0
x3	4	3	3	2	1	1	0
x4	4	3	3	2	1	1	0
x5	9	7	7	5	4	3	2
x6	4	3	3	2	1	1	0
x7	4	3	3	2	1	1	0
y1	5	3	3	2	1	1	0
y2	5	3	3	2	1	1	0
y3	4	3	3	2	1	1	0
y4	4	3	3	2	1	1	0

Tabela 5 – Tipologia de Estados de Condição – valores das variáveis observadas

MODELO ESTRUTURAL				
VARIÁVEIS	IMPACTOS TEÓRICOS			
	QM	QO	FO	E/C
QM			0,5	0,4
QO			0,5	0,35
FO				0,25
E/C				

Tabela 6 – Modelo Estrutural - coeficientes de impacto

MODELO DE MEDIDA FORMATIVO							
VARIÁVEIS	IMPACTOS TEÓRICOS						
	QM	QM	QM	QM	QO	QO	QO
x1	0,3						
x2		0,1					
x3			0,2				
x4				0,4			
x5					0,05		
x6						0,2	
x7							0,75

Tabela 7 – Modelo de medida formativo - coeficientes de impacto

MODELO ESTRUTURAL				
VARIÁVEIS	IMPACTOS TEÓRICOS			
	QM	QO	FO	E/C
QM			0,5	0,4
QO			0,5	0,35
FO				0,25
E/C				

Tabela 8 - Modelo reflectivo - coeficientes de impacto

Segundo: com base nestes dados definidos a priori, foram seguidamente gerados dados com ruído (perturbação) aleatório, com distribuição pré-determinada uniforme utilizando o Excel. A geração dos dados artificiais foi sucessivamente efectuada com a introdução crescente de ruído. Em cada conjunto de dados foram gerados 1208 conjuntos de observações.

Terceiro: as diferentes observações foram seguidamente importadas (após conversão em formato txt) para o software SmartPLS (Institute of Operations Management and Organizations), apresentando-se no Anexo 2., os resultados obtidos, da simulação inicial (menor ruído).

Quarto: identificação, estimação e teste de adequação do modelo

Um modelo está identificado se for possível obter uma estimativa única para cada um dos parâmetros que devem ser calculados. A Tabela 9 e a Tabela 10 mostram as estimativas dos impactos directos e os respectivos desvios padrão (entre parênteses). A partir das estatísticas t , calculadas por simples coeficiente entre as médias e os respectivos padrões constata-se que os valores são estatisticamente significativos.

	QM	QO		EC	FO
x1 -	0,541362 (0,019789721)		y1		0,959121 (0,003342)
x2 -	0,181758 (0,009881916)		y2		0,96807 (0,002654)
x3 -	0,340922667 (0,038489093)		y3	0,972498 (0,003815)	
x4 -	0,737397333 (0,00717665)		y4	0,976444 (0,003036)	
x5 -		0,044642667 (0,023136819)			
x6 -		0,177479 (0,020640101)			
x7 -		0,982260667 (0,00737372)			

Tabela 9 - Modelo formativo – e modelo reflectivo: estimativas dos impactos directos e seus desvios padrão

	EC	FO
FO -	0,225594 (0,16555374)	
QM -	0,445687 (0,10231516)	0,52198733 (0,03245567)
QO -	0,57432433 (0,16167328)	0,76197233 (0,05039822)

Tabela 10 – Modelo estrutural - estimativas dos parâmetros e dos seus desvios padrões

Avaliação do ajustamento e análise dos resultados: o modelo apresenta robustez conforme decorre dos dados apresentados na Tabela 11, que apresenta os valores das

medidas de adequação do modelo, para três níveis de ruído (o primeiro com ruído mais baixo, um caso de ruído médio e o terceiro com ruído mais alto).

		AVE	Composite Relability	R Square	Cronbachs Alpha
Sit1	EC	0,947789	0,973194	0,950639	0,945002
	FO	0,926336	0,961759	0,931313	0,920747
Sit2	EC	0,964418	0,981887	0,663198	0,963128
	FO	0,947864	0,973234	0,592596	0,945145
Sit3	EC	0,986396	0,993152	0,391698	0,98621
	FO	0,97919	0,989485	0,230257	0,978753

Tabela 11 - Quality Criteria - Overview - com introdução crescente de ruído

Sexto: A síntese das conclusões é que o modelo é estável e robusto à introdução de ruído e que a proposta parece fazer sentido, constituindo uma forma alternativa de estimar o estado de condição de uma máquina, para suportar uma política de manutenção preditiva CBM (Silva, A.R., Lobo, V., & Vairinhos, V, 2009).

3.1.2. Aplicação experimental do modelo proposto a dados reais

Após a etapa da identificação, deve-se então partir para a recolha e preparação das variáveis que fazem parte do modelo. Uma vez na posse dessas variáveis, pode-se então avançar para o procedimento de análise de dados.

Os dados obtidos referem-se a três conjuntos diferentes de “cases”, correspondentes a três equipamentos. Este dados foram seguidamente importados (após conversão em formato .txt) para o software SmartPLS2008.

Cada conjunto de observações tem pouca ou nenhuma variabilidade nos valores observados Tabela 12. De facto, na janela temporal utilizada existe um conjunto de variáveis que sofrem pouca (ou nenhuma) variação, o que gera situações de colinearidade. As variáveis formativas x1 e x2 apresentam pouca variação o que decorre igualmente da janela temporal estreita e de os dados reflectirem apenas o motor principal (se tivesse sido considerado todo o sistema propulsor haveria variabilidade⁵) As variáveis x3 e x4 só têm alterações significativas quando as pessoas são substituídas (o que ocorre tipicamente a cada dois/três anos). As variáveis x5 e x6, apresentam alguma variação, x5, em relação com

⁵ Tipicamente um motor principal é robusto. As falhas e avarias ocorrem nos periféricos.

alguma variação nas condições climáticas, x6, decorrente da missão do momento. Já x7 tem pouca variação (o que reflecte o alinhamento com o estabelecido para a operação das máquinas). Só da junção das fontes é possível obter alguma variabilidade.

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	y1	y2	y3	y4
média	4	3	4	3	5,346	1,745	3,06	1,0	4,0	4,0	3,31
desvio padrão	0,0	0,0	0,0	0,0	1,230	1,529	0,87	0,0	0,0	0,0	0,46
média	3,05	2	2	1	5,616	2,255	3,296	2,261	4	4	3,470
desvio padrão	0,22	0,0	0,0	0,0	1,111	1,432	0,806	0,489	0,0	0,0	0,49
média	3,83	3,67	3,24	1,64	5,71	2,64	3,12	3,15	2,075	3,69	1,43
desvio padrão	0,37	0,50	0,43	0,95	1,89	1,46	0,33	0,35	1,44	0,46	1,92

Tabela 12 - Média e desvios padrões dos valores das variáveis indicadoras, para os diferentes equipamentos

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	y1	y2	y3	y4
média	3,770	2,818	3,486	2,443	5,435	1,926	3,120	1,443	3,863	3,979	3,221
desvio padrão	0,421	0,498	0,843	0,899	1,272	1,529	0,841	0,751	0,626	0,145	0,848

Tabela 13 - Média e desvios padrões dos valores das variáveis indicadoras, para o conjunto dos equipamentos

Análise dos resultados

Coefficientes de impacto: Os coeficientes de impacto (modelo estrutural) medem o efeito sobre uma variável latente endógena de uma variação unitária de outra variável.

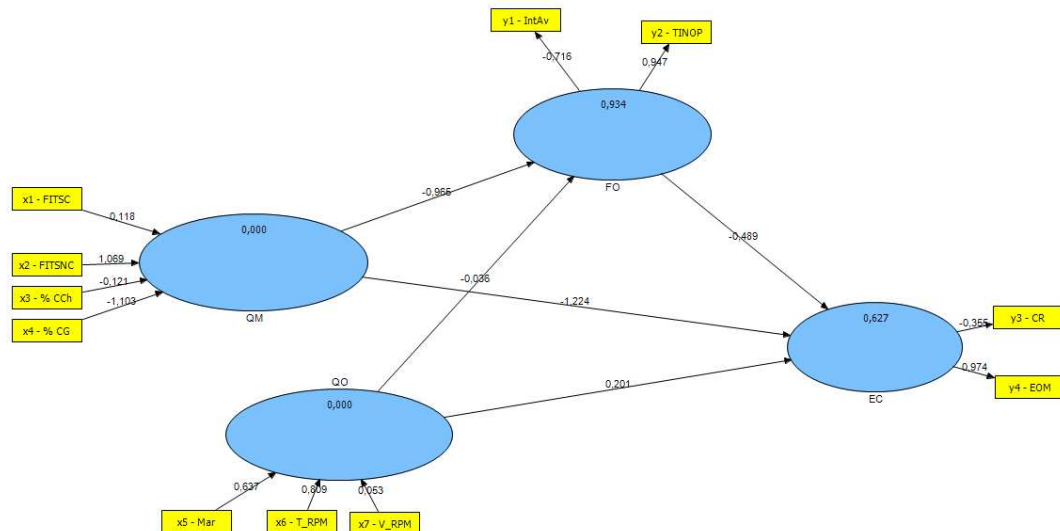


Figura 11 - Resultados da aplicação do modelo

	EC		FO	
	Postulados	Obtidos	Postulados	Obtidos
EC				
FO	0,25	-0,489		
QM	0,40	-1,224	0,50	-0,966
QO	0,35	+0,201	0,50	-0,036

Tabela 14 - Modelo estrutural – impactos

	Total Effects	
	EC	FO
EC		
FO	-0,48259	
QM	-0,751792	-0,965421
QO	0,218401	-0,035676

Tabela 15 – Modelo estrutural - efeitos totais

Relativamente aos impactos directos e analisando o diagrama da Figura 11 e a Tabela 14, verifica-se:

- Estado de Condição (EC): a variável com mais impacto no EC é (QM); a variável com menor impacto é QO. FO tem algum impacto no EC e QO ainda menos.
- Fiabilidade Operacional (FO): é influenciada por QM e muito pouco por QO;

No que concerne aos impactos totais – transpostos os valores do Anexo 3. para a Tabela 15, verifica-se:

- A variável com mais impacto no Estado de Condição (EC) é a Qualidade de Manutenção (QM), com menor impacto é QO e FO tem algum impacto no EC;
- FO é influenciada por QM e muito pouco por QO.

Pesos dos indicadores: a análise do modelo de medida decorre dos valores da Tabela 16.

- QM: querendo-se influenciar QM a actuação terá de ser efectuada sobre as variáveis indicadoras x2 e x4. Actuar sobre x1 e x3 terá um impacto pouco significativo. Como QM é variável latente com maior impacto no Estado de Condição, de acordo com os dados actuar sobre x2 e x4 terá impacto em EC.
- QO: querendo-se influenciar QO a actuação terá de ser efectuada sobre as variáveis indicadoras x5 e x6. Actuar sobre x7 terá um efeito quase nulo.

	Weights or Loadings							
	EC		FO		QM		QO	
	Postulados	Obtidos	Postulados	Obtidos	Postulados	Obtidos	Postulados	Obtidos
X1					0,30	0,118		
X2					0,10	1,069		
X3					0,20	-0,121		
X4					0,40	-1,103		
X5							0,05	0,637
X6							0,20	0,809
X7							0,75	0,053
Y1	0,806	-0,716						
Y2	0,806	0,947						
Y3			0,46	-0,355				
Y4			0,46	0,974				

Tabela 16 - Modelo de medida – peso dos indicadores

Índices das variáveis latentes: os valores índices das variáveis latentes constam da Tabela 17.

A situação é de “óptimo”, tendo em conta os valores postulados inicialmente (ver Tabela 4)

	LX Index Values	
	Postulado (óptimo)	Obtido
EC	2,92	4,64
FO	3,6	7,99
QM	3,36	3,4
QO	4,3	3,6

Tabela 17 - Índices das variáveis latentes

Qualidade dos resultados:

O coeficiente de determinação R^2 tem valor elevado para FO, o que indica capacidade explicativa do modelo. Mesmo para EC os resultados mostram uma capacidade explicativa de 63%.

No que se refere à AVE, a proporção da variância dos indicadores de medida explicada é sempre superior a 0,53. No caso de EC, esta variável explica 53% dos indicadores associados, y3 e y4. No caso de FO, esta variável explica 70% dos indicadores associados y1 e y2.

	AVE	Composite Reliability	RSquare	Cronbachs Alpha	Communality	Redundacy
EC	0,537800	0,293343	0,626722	-0,314830	0,537801	-0,467638
FO	0,704560	0,082616	0,933735	-1,657840	0,704560	0,624171
QM					0,116013	
QO					0,421507	

Tabela 18 - Quality Criteria - Overview –

Análise crítica aos resultados:

Analisando os resultados obtidos a partir dos valores dos impactos directos, verifica-se que a variável com maior impacto em EC é QM, em linha com o postulado. Contudo, o efeito marginal de uma variação unitária de QM em EC é, de acordo com os resultados obtidos, de sinal contrário ao esperado. Donde, ou o postulado inicial não se verifica (o que não acreditamos), ou o modelo inicial tem de ser reformulado. De facto acreditamos que a janela temporal de obtenção dos dados é muito estreita e que existe necessidade de reformular o modelo e de melhorar o processo de recolha dos dados relativos às variáveis observáveis. Igualmente as mesmas observações podem ser retiradas no que respeita aos pesos dos indicadores. Adicionalmente, cremos que o EC actual é influenciado pela QM do momento anterior e não pela QM do momento actual. Igual raciocínio pode ser efectuado em relação à QO. Deste modo, cremos que deve ser analisado o efeito que a QM e a QO do momento N exercem sobre a FO e o EC do momento N+1.

Assim, cremos que o modelo apresenta capacidade explicativa para o médio / longo prazo. Deste modo, é de estudar a adopção de um outro modelo (reformulando o proposto), com outros indicadores de maior facilidade de obtenção de dados para intervalos de tempo curtos. Além disso, futuramente os dados deverão considerar todo o sistema propulsor e não apenas o motor principal pois, caso tivesse sido considerado todo o sistema propulsor haveria variabilidade nos resultados, sendo expectável que o valor final obtido para EC fosse outro.

4. Conclusões

Neste trabalho é proposta a utilização de SEM, alargando a utilização do conceito de variável latente, para modelar o estado das máquinas com vista à definição de políticas de manutenção “on condition”, sendo proposto um modelo específico para motores marítimos.

A proposta parece fazer sentido quando testada apenas com dados artificiais, constituindo uma forma alternativa de estimar o estado para suportar uma política de manutenção preditiva.

A introdução de dados reais releva algumas fragilidades do modelo. Estas fragilidades, pensamos nós, resultam sobretudo da fragilidade na recolha de dados. Com efeito a janela temporal para muitas das variáveis é demasiado estreita para que exista uma recolha de dados com relevância estatística.

Não obstante, a convicção é de que a metodologia apresenta potencialidades para problemas de modelação do estado das máquinas, tendo em vista implementar políticas de manutenção baseadas no estado ou condição.

Desenvolvimentos futuros:

O processo de recolha de dados tem de ser melhorado, alargando a janela temporal. Para esse efeito parece interessante obter dados históricos acumulados. Outro caminho, consiste em diversificar as fontes de recolha de dados, ou seja, recolher dados de mais equipamentos.

Igualmente, é de explorar a construção de modelos que “funcionem” melhor no curto prazo. Para o efeito apresenta-se, no Anexo 4., um novo modelo que corresponde à reformulação do modelo agora testado. A construção deste novo modelo tem como objectivo obter resultados com maior utilidade operacional.

Adicionalmente, é de considerar a aplicação da metodologia a outros equipamentos, que não apenas o equipamento ou sistema propulsor, como é o caso do sistema gerador de energia.

Finalmente, é de estudar a hipótese de alargar a utilização da metodologia SEM à análise do Estado de Condição de todo o navio, como sistema complementar de apoio à decisão.

Bibliografia

- Amirat, Y., Benbouzid, M.E.H. , AL-Ahmar, E. Bensaker, B., & Turri, S. (2009). A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13, 2629-2636.
- Baço, F.L., (2006). *Data Mining*. Elementos de estudo da Disciplina Data Mining. Pós-graduação em Estudos de Mercado e CRM. Lisboa: Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação da Universidade Nova de Lisboa.
- Bengtsson, M. & Jackson, M. (2004). Important Aspects to take into Consideration when Deciding to Implement Condition Based Maintenance. *The 17th Conference of Condition Monitoring and Diagnostic Management*, England, Cambridge: The Central Printing Services, University of Birmingham, UK.
- Bengtsson, M. (2003). Standardization Issues in Condition Based Maintenance. *The 16th Conference of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, Sweden: Växjö University Press.
- Bengtsson, M. (2004). Condition Based Maintenance Systems Technology – Where is Development Heading? *The 17th Conference of Euromaintenance*, Spain, Barcelona: Puntex - Publicaciones.
- Bengtsson, M., Olsson, Funk, P., & Jackson, M. (2006). Technical Design of Condition Based Maintenance Systems – A Case Study using Sound Analysis and Case-Based Reasoning. *The 8th Conference of Maintenance and Reliability*, USA, Knoxville.
- Bentler, P.M.& Wu, E.C.J.,(2002). EQS 6 for windows user's guide. Encino: Multivariate Software.
- Blanchard, B.S. (1998). *Logistics engineering and management* (5th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Bollen, K.A. (1989), *Structural Equations with Latent Variables*. New York: John Wiley and Sons.
- Cabral, J.P.S., (2006). *Organização e gestão da manutenção: dos conceitos à prática* (6^a ed.). Lisboa: Lidel.
- Chin, W. W., (1998), "The Partial Least Squares Approach to Structural Equation Modelling", in Marcoulides, G.A. (ed.), *Modern Methods for Business Research*, cap. 10, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Mah Wah.
- Christer, A. H. & Wang, W. (1995). A simple condition monitoring model for a direct monitoring process. *European journal of Operational Research*, 82, 258-269.
- Ciarapica, F.E., & Giachetta, G. (2006). Managing the condition-based maintenance of a combined-cycle power plant: an approach using soft computing techniques. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, 316-325.
- de Achermann, D. (2008). *Modelling, Simulation and Optimization of Maintenance Strategies under Consideration of Logistic Processes*. Unpublished doctoral dissertation, thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- Didelet, F. & Viegas, J.C. (2003). *Manutenção*. Elementos de estudo. Setúbal: Instituto Politécnico de Setúbal.
- Dragomir, O.E., Gouriveau, R., Dragomir, F., Minca, & E. Zerhouni, N. (2009). Review Of Prognostic Problem In Condition-Based Maintenance, hal-00418761, version 1 - 21 Sep 2009, Author manuscript, published in "European Control Conference, ECC'09.", Budapest : Hungary.
- Efron, B. & Tibshirani, R.J., (1993). *An Introduction to the Bootstraps*. USA: Chapman & Hall/CRC.
- EN 13306, (2001). *Maintenance terminology*. European Standard, CEN/TC 319: AFNOR.
- Hair, J.F., Black, W.C., Babin, B.J., & Anderson, R.L. (2006). *Multivariate Data Analysis* (6th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson International Edition.

- Han, T. & Yang, B. (2006). Development of an e-maintenance integrating advanced techniques. *Computers in Industry*, 57, 569-580.
- Heng, A., Tan, A. C.C., Mathew, J., Montgomery, N., Banjevic, D., Jardine, A.K.S.,(2009). Intelligent condition- based prediction of machine reliability. *Mecchanical Systems and Signal Processing*, 23, 1600-1614.
- ILDINAV (2001). Doutrina de manutenção para os navios da Armada, Marinha.
- Institute of Operations Mangement and Organizations, U.O.H., Germany (2008). SmartPLS. 2008.
- Jardine, A. K. S. (1996). Enhacing Sistem Reliability through Maintenance Decision Making, *IEEE*, Hong Kong Pollytechnic University, 1004-1007.
- Jardine, A. K. S. (2002). Optimizing Condition Based Maintenance Decisions. *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, Toronto, 90-97.
- Jardine, A. K. S., Lin, D. & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20, 1483-1510.
- Jarrel, D., Sisk, D. & Bond, L., (2002). Prognostics and Based Condition Based Maintenance (CBM). A Scientific Crystal Ball. *Pacific Northwest National Laboratory*.
- Jemec, V. & Grum, J., (2009). Automation of procedures and controls of railway materials at condition based maintenance. *The 10th Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing. Slovenia*, 91-107.
- Kaplan, D. (2000). Structural equation modeling: foundations and extensions. Thousand Oaks: Sage Publications.
- Kline, R. (1998), *Principles and practice of structural equation modeling*. NY: Guilford Press.
- Kothamasu, R. (2005). *Intelligent Conondition Based Maintenance – A Soft Computing Approach to System Diagnosis and Prognosis*. Doctoral dissertation, thesis, Cincinati, USA: University of Cincinaty.
- Nilsson, J. (2007). Reliability and Cost Centered Maintenance Methods Nuclear Power and Reliability Centered Maintenance (RCM). Project in the course 2C5060 Maintenance Management in Power Systems.
- Nilsson, J. (2009). On Maintenance Mangement of Wind and Nuclear Power Plants. Licentiate Thesis, Stockolm, Sweden: KTH - Royal Institute of Technology.
- Rao, M., Yang, H. & Yang, H. (1998). Integrated distributed system architecture for incidents monitoring and diagnosis. *Computers in Industry*, 37, 145-151.
- Salgueiro, M.F.R.F, (1995). Modelos de Equações Estruturais: Aplicação do LISREL a um Estudo de Socialização no Trabalho. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Empresariais: ISCTE.
- Scarf, P. A. (1997).On the application of mathematical models in maintenance. *European journal of Operational Research*. 99, 493-506.
- Shi, J. Z., Gu, F. Goulding, P., & Ball, A. (2007). Integration of multiple platforms for real-time remote model-based condition monitoring. *Computers in Industry*, 58, 531-538.
- Shikari, B. (2006). Automation in condition-based maintenance using vibration analysis. Bhopal, India: Maulana Azad National Institute of Technology.
- Silva, A.R., Lobo, V & Vairinhos, V. M. (2009). Modelação de Equações Estruturais para avaliar e monitorizar o Estado de Condição de um sistema mecânico. *JOCLAD 2009*, 126-129.
- Sun, Y., Ma, L., Mathew, J., Wang, W. & Zhang, S. (2006). Mechanical systems hazard estimation using condition monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20, 1189-1201.
- Swanson, L. (2001).Linking maintenance strategies to performance. *International journal of Production economics*. 70, 237-244.
- Vairinhos, V.M., Lobo, V., & Parreira, R.R. (2009). *Introdução à Análise de dados de manutenção. Projecto MECPAB*. Lisboa: Escola Naval.

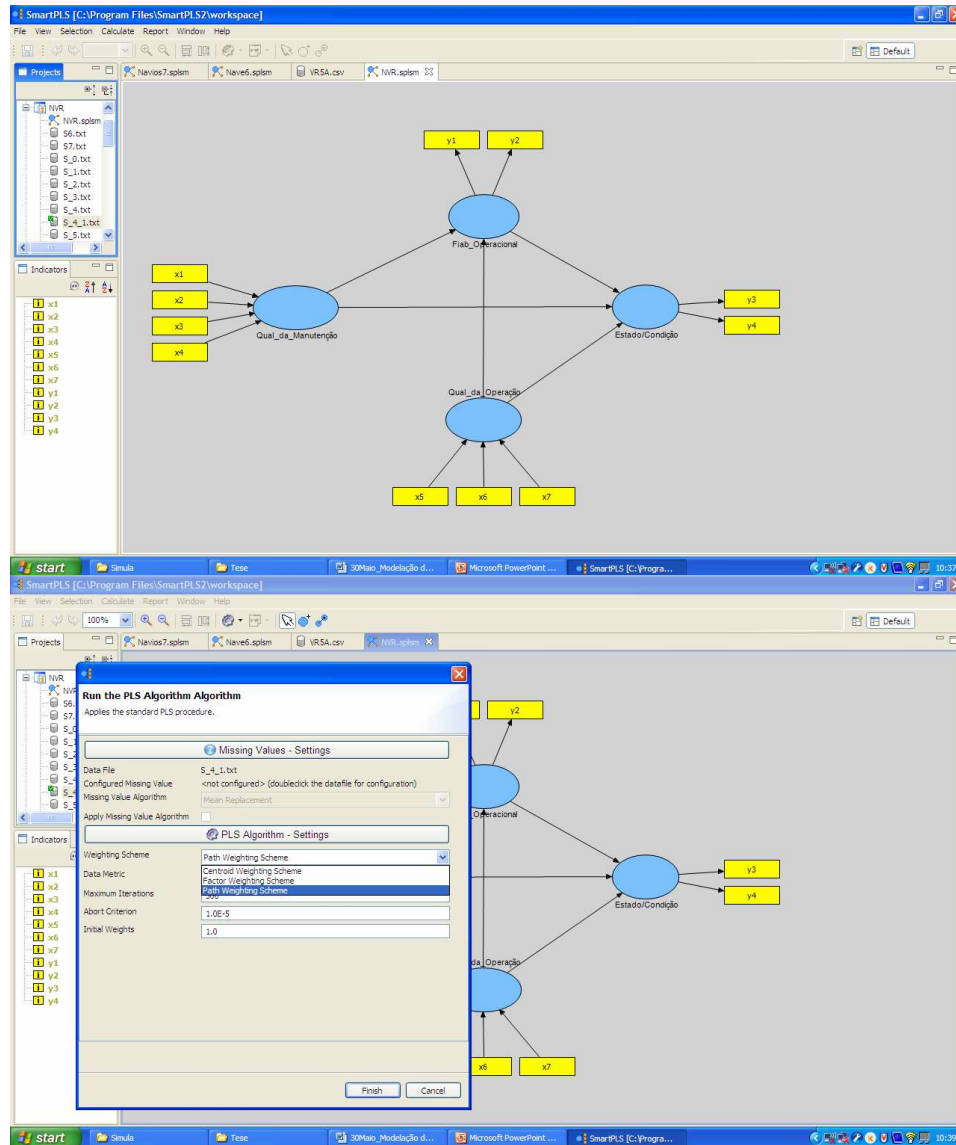
- Vilares, M.J. & Coelho, P. S. (2005). *Satisfação e Lealdade do Cliente, Metodologias de avaliação, gestão e análise*. Lisboa: Escolar Editora.
- Young, S.K. (2003). Condition Based Failure Prediction and Processing – Scheme for Preventive Maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*, 52(3).
- Zhou, Z. D., Chen, Y.P. & Fuh, A. Y. C. (2000). Integration Condition Monitoring and Fault for Modern Manufacturing Systems. *Annals of CIRP*, 49, 387-390.

Anexo 1.-Relatório SmartPLS (Institute of Management and Organizations, UOH, Germany (2008))

Table of contents (complete)		
Model – Specification; <ul style="list-style-type: none"> • Measurement Model; • Measurement Model Specification • Manifest Variable Scores (Original) • Structural Model Specification 	PLS- Quality Criteria <ul style="list-style-type: none"> • Overview • Redundancy • Cronbachs Alpha • Latent Variable Correlations • R Square • Cross Loadings • AVE • Communality • Total Effects • Composite Reliability 	PLS - Calculation Results <ul style="list-style-type: none"> • Stop Criterion Changes • Outer Loadings • Outer Model (Weights or Loadings) • Path Coefficients • Latent Variable Scores • Manifest Variable Scores (Used) • Outer Weights
Data Preprocessing - Results (chronologically) <ul style="list-style-type: none"> • Step 0 (Original Matrix) 	Index Values - Results <ul style="list-style-type: none"> • Measurement Model (restandardised) • Path Coefficients • Measurement Model • Latent Variable Scores (unstandardised) • Index Values for Latent Variables 	

Anexo 2 - .Aplicação experimental com dados artificiais

Simulação com dados aleatórios, suporte à comunicação nas JOCLAD 2009, Abril



PLS – Quality - Overview

	AVE	Composite	R Square	Cronbachs	Communality	Redundancy
Estado/Condição	0,947789	0,973194	0,950639	0,945002	0,947789	0,071226
Fiab_Operacional	0,926336	0,961759	0,931313	0,920747	0,926336	0,272784
Qual_da_Manutenção					0,255254	
Qual_da_Operação					0,334301	

Latent Variable Correlations

	Estado/Condição	Fiab_	Qual_da_	Qual_da_
Estado/Condição	1,000000			
Fiab_Operacional	0,942604	1,000000		
Qual_da_Manutenção	0,587469	0,544140	1,000000	
Qual_da_Operação	0,786685	0,804974	0,014797	1,000000

Cross-Loadings

	Estado/Condição	Fiab_Operacional	Qual_da_Manutenção	Qual_da_Operação
x1	0,319173	0,286870	0,535867	0,010577
x2	0,128288	0,122357	0,221370	0,002563
x3	0,219330	0,197960	0,368940	0,008851
x4	0,431143	0,407442	0,740771	0,007520
x5	0,056658	0,057987	-0,014452	0,072029
x6	0,139253	0,152177	0,018287	0,183167
x7	0,773356	0,789546	0,012501	0,981919
y1	0,852290	0,957991	0,495119	0,723768
y2	0,956528	0,966915	0,549408	0,820495
y3	0,971378	0,881562	0,543583	0,736912
y4	0,975706	0,951119	0,598165	0,792712

Total Effects

	Estado/Condição	Fiab_Operacional	Qual_da_Manutenção	Qual_da_Operação
Estado/Condição				
Fiab_Operacional	0,040801			
Qual_da_Manutenção	0,575955	0,532345		
Qual_da_Operação	0,778163	0,797097		

Composite Reliability

	Composite Reliability
Estado/Condição	0,973194
Fiab_Operacional	0,961759
Qual_da_Manutenção	
Qual_da_Operação	

PLS – Calculation Results

Outer Loadings

	Estado/Condição	Fiab_Operacional	Qual_da_Manutenção	Qual_da_Operação
x1			0,535867	
x2			0,221370	
x3			0,368940	
x4			0,740771	
x5				0,072029
x6				0,183167

x7				0,981919
y1		0,957991		
y2		0,966915		
y3	0,971378			
y4	0,975706			

Outer Model (Weights or Loadings)

	Estado/Condição	Fiab Operacional	Qual da Manutenção	Qual da Operação
x1			0,531567	
x2			0,177732	
x3			0,363944	
x4			0,731039	
x5				0,053514
x6				0,181024
x7				0,980720
y1		0,957991		
y2		0,966915		
y3	0,971378			
y4	0,975706			

Path Coefficients

	Estado/Condição	Fiab Operacional	Qual da Manutenção	Qual da Operação
Estado/Condição				
Fiab Operacional	0,040801			
Qual da Manutenção	0,554234	0,532345		
Qual da Operação	0,745640	0,797097		

Outer Weights

	Estado/Condição	Fiab Operacional	Qual da Manutenção	Qual da Operação
x1			0,531567	
x2			0,177732	
x3			0,363944	
x4			0,731039	
x5				0,053514
x6				0,181024
x7				0,980720
y1		0,488986		
y2		0,549744		
y3	0,492787			
y4	0,534298			

Index Values .- Results
Measurement Model (restandardised)

	Estado/Condição	Fiab Operacional	Qual da Manutenção	Qual da Operação
x1			0,190361	
x2			0,061542	
x3			0,127915	
x4			0,257131	
x5				0,018816
x6				0,062415
x7				0,338877
y1		1,666338		
y2		1,014928		
y3	1,408280			
y4	1,256272			

Path Coefficients

	Estado/Condição	Fiab Operacional	Qual da Manutenção	Qual da Operação
Estado/Condição				
Fiab Operacional	0,041057			
Qual da Manutenção	0,132487	0,126461		
Qual da Operação	0,117562	0,124891		

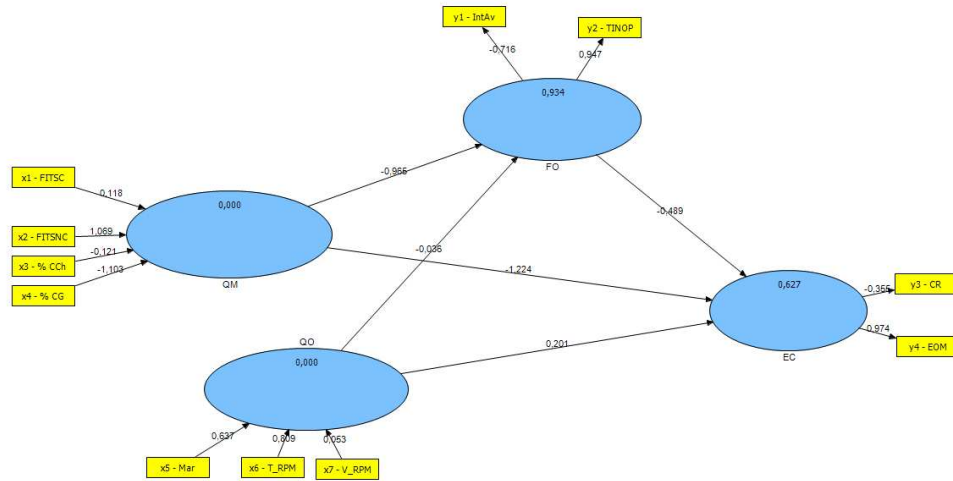
Measurement Model

	Estado/Condição	Fiab Operacional	Qual da Manutenção	Qual da Operação
x1			0,298863	
x2			0,096620	
x3			0,200825	
x4			0,403692	
x5				0,044787
x6				0,148570
x7				0,806643
y1		0,621474		
y2		0,378526		
y3	0,528524			
y4	0,471476			

Index Values for Latent Variables

	LV Index Values
Estado/Condição	2,598821
Fiab Operacional	2,521186
Qual da Manutenção	4,477463
Qual da Operação	4,484044

Anexo 3 - Aplicação experimental com dados reais



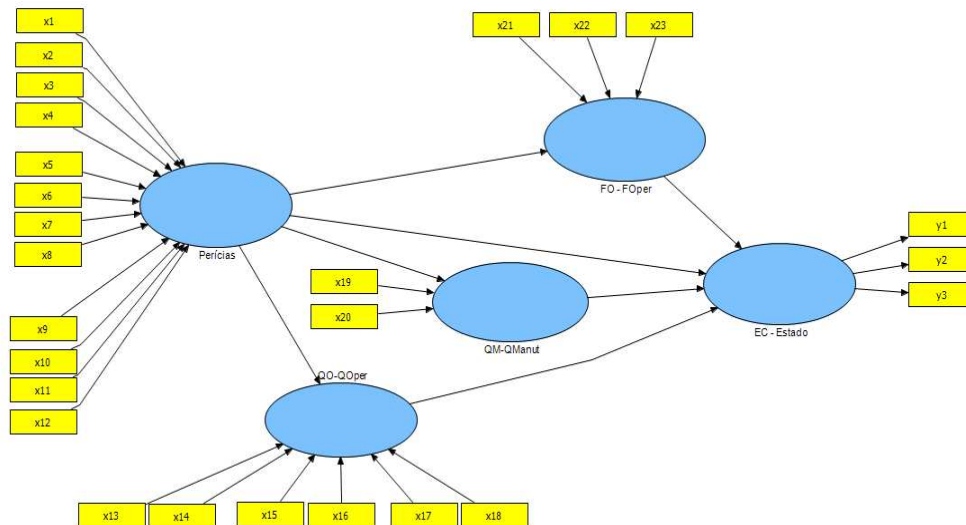
PLS – Quality criteria							
Overview							
	AVE	Composite	R Square	Cronbachs	Communality	Redundancy	Cronbachs
EC	0,537800	0,293343	0,626722	-0,314830	0,537801	-0,467638	-0,314830
FO	0,704560	0,082616	0,933735	-1,657840	0,704560	0,624171	-1,657840
QM					0,116013		
QO					0,421507		
Latent variable correlations							
		EC	FO	QM	QO		
EC		1,000000					
FO		0,684446	1,000000				
QM		-0,750442	-0,965641	1,000000			
QO		0,213754	-0,041643	0,006181	1,000000		
Cross Loadings							
		EC	FO	QM	QO		
x1 - FITSC		-0,178732	0,122022	0,010897	-0,217359		
x2 - FITSNC		-0,431169	-0,300109	0,410106	-0,126648		
x3 - % CCh		0,043789	0,361561	-0,255411	-0,158245		
x4 - % CG		0,238730	0,558101	-0,480118	-0,134178		
x5 - Mar		0,122631	0,018769	-0,032829	0,536242		
x6 - T_RPM		0,158646	-0,065869	0,033869	0,772887		
x7 - V_RPM		0,135628	-0,005491	-0,005921	0,616130		
y1 - IntAv		-0,181300	-0,716080	0,569861	0,190109		

y2 - TINOP		0,790440	0,946758	-0,970321	0,034504
y3 - CR		-0,355001	0,116768	0,034463	-0,256367
y4 - EOM		0,974461	0,753377	-0,786990	0,164943
Total Effects					
	EC	FO	QM	QO	
EC					
FO	-0,489259-				
QM	-0,751792	-0,965421			
QO	0,218401	-0,035676			
Composite eliability					
EC	0,293343				
FO	0,082616				
QM					
QO					
PLS – Calculation Results					
Outer Loadings					
	EC	FO	QM	QO	
x1 - FITSC			0,010897		
x2 - FITSNC			0,410106		
x3 - % CCh			-0,255411		
x4 - % CG			-0,480118		
x5 - Mar					0,536242
x6 - T_RPM					0,772887
x7 - V_RPM					0,616130
y1 - IntAv		-0,716080			
y2 - TINOP		0,946758			
y3 - CR	-0,355001				
y4 - EOM	0,974461				
Path coefficients					
	EC	FO	QM	QO	
EC					
FO	-0,489259				
QM	-1,224133	-0,965421			
QO	0,200946	-0,035676			
Outer Weights					
	EC	FO	QM	QO	
x1 - FITSC			0,117879		
x2 - FITSNC			1,068525		

x3 - % CCh			-0,120697	
x4 - % CG			-1,103227	
x5 - Mar				0,636972
x6 - T_RPM				0,809261
x7 - V_RPM				0,053498
y1 - IntAv		-0,361172		
y2 - TINOP		0,783064		
y3 - CR	-0,226667			
y4 - EOM	0,943632			
Index Values - Results				
Path coefficients				
	EC	FO	QM	QO
EC				
FO	0,210197			
QM	0,990703	-1,818627		
QO	-0,168878	-0,069789		
Measurement Model				
	EC	FO	QM	QO
x1 - FITSC			0,265669	
x2 - FITSNC			2,035915	
x3 - % CCh			-0,135879	
x4 - % CG			-1,165705	
x5 - Mar				0,457742
x6 - T_RPM				0,484071
x7 - V_RPM				0,058187
y1 - IntAv		-1,706217		
y2 - TINOP		2,706217		
y3 - CR	1,882907			
y4 - EOM	-0,882907			
LX – Index Values				
EC	4,647557			
FO	7,993093			
QM	3,416981			
QO	3,601934			

Anexo 4 - Proposta de novo modelo

Representação gráfica:



Modelo Estrutural: O modelo estrutural é composto por cinco variáveis latentes:

Três exógenas: Perícias (P), Qualidade Operacional (QO) e Fiabilidade Operacional (FO);
Duas endógenas: Qualidade da Manutenção (QM) e Estado/Condição (EC), sendo esta a variável mais importante, porque do seu valor resultará a decisão de intervir ou não.

Os efeitos totais previstos são:

Efeitos directos: os que decorrem de cada uma das outras quatro variáveis latentes na relação directa com EC;

Efeitos indirectos: os que resultam das relações entre as outras quatro variáveis latentes.

Modelo de medida: o modelo de medida é misto, com quatro modelos formativos relativos a P, QM, QO e FO e um reflexivo, variável objectivo EC.

Modelo Formativo associado à variável latente Perícias (P):

Constituído por doze variáveis formativas, que agrupáveis em três grupos de variáveis formativas:

P.1. Quatro associadas à experiência profissional: x1, x2, x3, x4;

P.2. Quatro associadas às competências adquiridas com formação profissional específica: x5, x6, x7, x8;

P.3. Quatro associadas à experiência adquirida naquele local de trabalho em concreto: x9, x10, x11, x12.

Grupo P1 – x1, x2, x3, x4		
É avaliado o nível de Experiência Profissional tendo em conta cinco factores:	N - Nº de meses na função (a preencher para cada elemento da guarnição)	G - Grau de importância para a experiência profissional (valores da escala, 1:5)
1.Embarcado em navios da mesma classe do actual (não inclui o actual navio)		5
2.Embarcado em navios doutra classe do actual		4
3.Formador da área de trabalho		3
4.Outras funções directamente relacionadas com a actual		2
5.Outras funções sem relação directa com a actual		1
O cálculo é efectuado em dois passos. No primeiro passo para cada elemento, obtendo-se o valor agregado da sua experiência profissional ($\sum_i N_i \times G_i$, $i=1,...5$). No segundo passo é calculada a média da experiência profissional do grupo, obtendo-se o nível de experiência agregado médio do grupo .		
Necessário considerar quatro grupos, correspondendo cada grupo a uma variável: X1: - Nível de experiência profissional médio dos oficiais; X2: - Nível de experiência profissional médio dos sargentos; X3: - Nível de experiência profissional médio dos cabos; X4: - Nível de experiência profissional médio dos marinheiros e grumetes.		
Recolha dos dados: 1) actualizar sempre que há rendição de pessoal (saídas ou entradas de novos) e 2) actualizar sempre com periodicidade mensal.		
Grupo P2 – x5, x6, x7, x8		
É avaliada a Formação Profissional agregada. Lista de cursos do Plano de Formação:	C - Tem o curso? Sim = 1; Não = 0 (a preencher para cada elemento da guarnição)	G - Grau de importância do curso (valores da escala, 1:5)
1.Curso A		e.g. 4
2.Curso B		e.g. 3
3.Curso C		e.g. 1
4.Curso D		e.g. 5
O cálculo é efectuado em dois passos. No primeiro passo para cada elemento, obtendo-se o valor agregado da sua formação profissional ($\sum_i C_i \times G_i$, $i=1,...k$). No segundo passo é calculada a média da formação profissional do grupo, obtendo-se o nível de formação médio do grupo .		
Necessário considerar quatro grupos, correspondendo cada grupo a uma variável: X5: - Nível de formação médio dos oficiais; X6: - Nível de formação médio dos sargentos; X7: - Nível de formação médio dos cabos; X8: - Nível de formação médio dos marinheiros e grumetes.		
Recolha dos dados: 1) actualizar sempre que há rendição de pessoal (saídas ou entradas de novos) e 2) actualizar sempre com periodicidade mensal.		
Grupo P3 – x9, x10, x11, x12		
Comissão no Navio - Tempo acumulado de comissão em meses		
Num primeiro passo a recolha é efectuada individualmente. No segundo passo é calculada a média da formação profissional do grupo, obtendo-se o nível de formação médio do grupo .		
Necessário considerar quatro grupos, correspondendo cada grupo a uma variável: X9: - Tempo médio de comissão dos oficiais; X6: - tempo médio de comissão dos sargentos; X7: - Tempo médio de comissão dos cabos; X8: - Tempo médio de comissão dos marinheiros e grumetes.		
Recolha dos dados: actualização com periodicidade mensal, tendo em conta as saídas e as entradas.		

Modelo Formativo associado á variável latente Qualidade Operacional (QO):

Constituído por seis variáveis formativas, agrupáveis em três grupos:

QO.1.Duas associadas ao tipo de missão: x13 – Tipo de missão actual, x14 – Tipo de missão do período anterior (missão);

QO.2.Duas associadas ao estado do mar: x15 – Estado do mar actual, x16 – Estado do mar no do período anterior (missão);

QO.3.Duas associadas à quantidade de manobras de faina (atracação e desatracação): x17 – Durante o actual período, x18 – No período anterior;

Grupo QO.1. – x13, x14		
É avaliado a “dureza” a que o sistema está sujeito, de acordo com o Tipo de Missão:	M – Está na missão? Sim = 1; Não = 0	G – Grau de dureza (valores da escala, 1:5)
1.Missão SAR		
2.Missão PHIBEX1		
3. Missão PHIBEX2		
4. Trânsito activo		
5. Transito		

A dureza é calculada por $(\sum_i M_i \times G_i, i=1,...5)$.

O pressuposto é de que missões mais exigentes para a operação levam a maior desgaste dos sistemas. “Para QO interessa o que se faz hoje e o que foi feito ontem”.

Recolha dos dados: pode ser obtido diariamente.

Grupo QO.2. – x15, x16		
É avaliado o Estado do Mar de acordo com a escala de Douglas (valores da Escala de 0-9):		Valor da Escala
	Mar Estanhado	1
	Mar Chão	2
	Mar Encrespado	3
	Pequena Vaga	4
	Cavado	5
	Grosso	6
	Alteroso	7
	Tempestuoso	8
	Encapelado	9
	Excepcional	9

Os valores são obtidos directamente do Diário de Navegação.

O pressuposto é de que mar mais exigente conduz a maior desgaste dos sistemas. “Para QO2 interessa o que se faz hoje e o que foi feito ontem”.

Recolha dos dados: pode ser obtido diariamente.

Grupo QO.3. – x17, x18	
X17: Diariamente contabilizam-se o número de manobras de faina efectuadas ou estados especiais de condição.	Quantidade
X18: Representa o número total de fainas do período anterior.	
Os valores são obtidos directamente do Diário de Navegação.	
O pressuposto é de que manobras mais exigentes (a baixas ou a muito altas RPM e com	

grandes variações de RPM conduzem a maior desgaste dos sistemas. “Para QO3 interessa o que se faz hoje e o que foi feito ontem”.

Recolha dos dados: pode ser obtido diariamente.

Modelo Formativo associado á variável latente Qualidade de Manutenção (QM):

Constituído por duas variáveis formativas:

x19 – FITS e x20 – Requisições não satisfeitas

X19, x20	
Lista de controlo de FITS não executadas hoje:	G - Grau de importância (valores da escala, 1:5)
1.	O valor obtido corresponde à soma dos “graus de importância” de cada FIT e de cada requisição não satisfeita.
2.	
3.	
4.	
5.	
.....	Deverá ser executado diariamente.

Modelo reflectivo:

Modelo Formativo associado á variável latente Estado de Condição (EC):

Constituído por três variáveis reflectivas:

y1, y2, y3					
Y1 – Intervalo entre avarias		Y2 – Tempo Imobilizado		Y3 – Estado Operacional do sistema	
Anual	4	0-7 dias	4	Sem limitações	4
Semestral	3	7-15 dias	3	Com limitações	3
Trimestral	2	15-30 dias	2	Degradado	2
Mensal	1	30-45 dias	1	Muito degradado	1
Inexistente	0	> 45 dias	0	INOP	0